Journal of Agroecology
Homepage: https://agry.um.ac.ir/

Research Article
Vol. 14, No. 1, Spring 2022, p. 69-94

Evaluation of Spatial Crop Water Use Efficiency in Khorasan Razavi Province

A. Koocheki[1*], M. Nassiri Mahallati[1], S. Asadi[2], and H. Zare[2]

Received: 20-12-2016
Revised: 16-08-2017
Accepted: 05-10-2017
Available Online: 15-06-2022

How to cite this article:
Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., Asadi, S., and Zare, H., 2022. Evaluation of spatial crop water use efficiency in Khorasan Razavi province. Journal of Agroecology 14(1):69-94.
DOI:10.22067/jag.v1i1.61172

Introduction

Water scarcity is the main challenging issue in supplying sufficient food in arid and semiarid regions. Agricultural production in Razavi Khorasan, like other arid and semiarid provinces, depends on underground water. Groundwater exploitation alongside climate change has dramatic effects on the availability of surface water for agricultural production in semiarid areas. Crop water use estimation is the first step to increasing Water Use Efficiency (WUE). From the water resource point of view, assessing the gap between actual and attainable crops, WUE is so important, especially for future mitigation strategies. The term water use efficiency refers to production per unit of water used by evapotranspiration, with units such as kg grain/ha per mm water or kg/m^3 water, so it does not scale in the 0-1 range. This paper aims to evaluate WUE for main crops (wheat, barley, sugar beet, onion, potato, tomato, cucumber, and watermelon) in the different areas of Razavi Khorasan province (Torbat-e Heydarieh, Torbat-e Jam, Chenaran, Mashhad, Sabzevar, Quchan, Kashmar, Gonabad, and Neyshabour) for 26 years (1985-2010).

Material and Methods

WUE shows crop production per unit of water use. It was calculated as production per unit of crop water used (CWU) by evapotranspiration. CWU was acquired by estimating two components: reference evapotranspiration (ET_o) and crop coefficient. ET_o was calculated via the Blaney-Criddle equation. Although this method has a coarse accuracy in comparison to other methods, this is ideal when only air-temperature datasets are available. We examined the relationship between yield and CWU, as well as WUE and CWU for wheat, tomato, alfalfa, and sugar beet. A polynomial line was fitted to describe the best relation between two variables. The maximum yield at each point of CWU was determined as the highest attainable yield. Mann-Kendall test was applied to detect the trend of data over time.

Results and Discussion

The long-term average of WUE showed a similar trend for wheat and barley. The highest wheat WUE was about 0.59 and 0.53 yield per m^3 in Torbat-e Jam and Chenaran. Chenaran and Torbat-e Heydarieh had the highest WUE of sugar beet (3.12 and 3.08 kg fresh root per m^3). The highest amount of potato WUE (4.05), tomato WUE (4.7), and onion WUE (4.9) were found in Torbat-e Jam, Chenaran, and Chenaran, respectively. Kashmar, Gonabad, and Sabzevar had the lowest WUE for most of the crops. It seems that high temperature during crop growth caused a decrease in WUE in the mentioned locations. WUE of all crops had an intense fluctuation between 1986 and 1996, while it modified in the later years to the extent that a mild increasing slope was found in WUE.

1- Professor, Department of Agrotechnology, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.
2- PhD student, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.
*- Corresponding Author, Email: akooch@um.ac.ir

A polynomial line was fitted to show yield and WUE changes, then the upper boundary line and the lower boundary line were fitted to represent attainable yield and WUE and minimum yield and WUE. The highest yields were obtained around 540, 880, 940, and 850 mm water use for wheat, alfalfa, sugar beet, and tomato, respectively and the law of diminishing returns was observed between yield and CWU. An increase in temperature caused yield and WUE to decrease. The upper boundary line was more resistant to environmental changes, whereas the lower boundary line was sensitive.

The effect of 1 and 2 ℃ temperature rise on yield and WUE was negligible, while with a three ℃ increase, yield and WUE of lower boundary line decreased by 20%. Although a three ℃ increase in temperature had a negligible impact on WUE in the higher boundary line, WUE in the lower boundary line decreased dramatically. Alfalfa was known as the most sensitive, and sugar beet was the most tolerant crop to temperature in terms of WUE.

Conclusion

WUE was negatively associated with mean annual temperature rise. The results indicated that global warming damages yield stability. Yield and CWU showed a positive correlation up to the maximum yield; then, excessive CWU increases led to yield decline. When temperature increases and environmental conditions become worse, appropriate agronomic management such as changing sowing date, balancing crop nutrition, and proper irrigation schemes can play an effective role in enhancing yield. We concluded that when temperature increase, the WUE gap will widen, and agronomic management will play a more important role in this condition.

Key Words: Blaney-Criddle equation, Crop yield, Mann-Kendall test, Water requirement

نشریه بوم شناسی کشاورزی
Homepage: https://agry.um.ac.ir/

مقاله پژوهشی

ارزیابی و پهنه‌بندی کارآیی مصرف آب در استان خراسان رضوی

علیرضا کوچکی[1]*، مهدی نصیری محلاتی[1]، سارا اسدی[2] و حسین زارع[2]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۸/۳۰
تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۰۵/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۷/۱۳

کوچکی، ع.، نصیری محلاتی، م.، اسدی، س.، و زارع، ح.، ۱۴۰۱. ارزیابی و پهنه‌بندی کارآیی مصرف آب در استان خراسان رضوی. بوم‌شناسی کشاورزی ۱۴(۱): ۹۴-۶۹.

چکیده

کشاورزی در استان خراسان رضوی مانند دیگر استان‌های خشک و نیمه خشک عمدتاً متکی به منابع زیرزمینی می‌باشد. یکی از روش‌هایی که باعث بهبود مدیریت بهره‌برداری آب و در نهایت، افزایش راندمان مصرف آب می‌شود، برآورد دقیق تبخیر و تعرق یا تخمین میزان آب مصرفی و نهایتاً کارآیی مصرف آب گیاهان می‌باشد. در این مطالعه، کارآیی مصرف آب بر اساس نیاز آبی محصولات کشاورزی استان خراسان رضوی، برای شهرستان‌های (تربت حیدریه، تربت جام، چناران، سبزوار، قوچان، کاشمر، گناباد، مشهد و نیشابور) در طول یک دوره ۲۶ ساله از سال ۱۳۶۲ تا ۱۳۸۸ محاسبه شد. نیاز آبی گیاهان زارعی (گندم، جو، پیاز، چغندرقند، سیب زمینی، گوجه‌فرنگی، خیار و هندوانه) از ضرب تبخیر و تعرق روزانه گیاه مرجع با استفاده از معادله بلانی-کریدل در ضریب گیاهی به‌دست آمد. همچنین تأثیر افزایش دما بر روند تغییرات کارآیی مصرف آب چهار گیاه گندم، چغندرقند، گوجه‌فرنگی و یونجه بررسی شد. برازش منحنی و ترسیم لایه مرزی با احتمال ۹۵ درصد اطمینان بالا و پایین به‌منظور تعیین میزان تغییرات عملکرد و کارآیی مصرف گیاهان زراعی نسبت به تغییرات نیاز آبی گیاه انجام شد. عملکرد محصولات با توجه به منحنی به سه سطح مدیریتی تقسیم شد. منحنی‌حد بالایی (مدیریت بالا) و حد پایین (مدیریت ضعیف) در نظر گرفته شد. روند تغییرات کارآیی مصرف آب گندم و جو در طول مدت مطالعه مشابه هم بود. بالاترین میانگین کارآیی مصرف آب گندم در تربت جام و چناران (۰/۵۹ و ۰/۵۳ کیلوگرم بر مترمکعب) مشاهده شد. کارآیی مصرف آب چغندرقند در چناران و تربت حیدریه (۳/۱۲ و ۳/۰۸ کیلوگرم بر مترمکعب) بیشترین انحراف را با میانگین استان (۲/۶۸ کیلوگرم بر مترمکعب) نشان داد. بیشترین کارآیی مصرف سیب‌زمینی در تربت جام (۴/۰۵ کیلوگرم بر مترمکعب) و پیاز و گوجه‌فرنگی (۴/۹ و ۴/۷ کیلوگرم بر مترمکعب) در چناران مشاهده شد. کارآیی مصرف آب هندوانه در دو شهر مشهد و نیشابور و کارآیی مصرف خیار در مشهد نسبت به میانگین استان (به‌ترتیب ۲/۱۸ و ۵/۴۲ کیلوگرم بر مترمکعب) بیشتر بود. کمترین کارآیی مصرف آب خیار به‌میزان ۴/۲۸ کیلوگرم بر مترمکعب نیز در تربت‌جام مشاهده شد. کاشمر، گناباد و سبزوار شهرهایی بودند که برای اکثر محصولات کارآیی مصرف آب کمی داشتند، احتمالاً این امر به‌دلیل دمای بالای هوا در طول فصل رشد محصولات و افزایش نیاز آبی گیاه می‌باشد. کارآیی مصرف آب اکثر محصولات در بین سال‌های ۶۵ تا ۷۵ دارای نوسانات زیادی بودند و روند قابل ملاحظه‌ای در این سال‌ها نداشتند، امّا در سال‌های بعد کارآیی مصرف آب محصولات به یک تعادل نسبی رسید و به‌طور میانگین با شیبی ملایم در حال افزایش بود. با افزایش یک درجه دما در طول دوره رشد گیاهان، اختلاف ناچیزی در کارآیی مصرف آب و عملکرد گیاهان استان در هر سه مدل مدیریت (مدیریت‌های مزرعه در سطح بالا، متوسط و ضعیف) مشاهده شد. افزایش سه درجه سانتی‌گراد دما تأثیر ناچیزی در مدل مدیریتی در سطح بالا شد، درحالی‌که باعث کاهش چشم‌گیری در کارآیی مصرف آب مدل متوسط و ضعیف شد. یونجه به‌عنوان حساس‌ترین گیاه به افزایش دما و چقندرقند به‌عنوان مقاومت‌ترین گیاه شناخته شد. نتایج این تحقیق نشان داد که افزایش دما باعث افزایش خلأ کارآیی مصرف آب می‌شود و مدیریت زراعی تأثیر مهم‌تری در کاهش خلا کارآیی مصرف آب در آینده خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: آزمون من- کندال، روش بلانی-کریدل، عملکرد محصولات زراعی، نیاز آبی

مقدمه

در سال‌های اخیر، دانشمندان و متخصصان علوم کشاورزی و اقلیم شناسی تحقیقات گسترده‌ای را در زمینه اقلیم-کشاورزی انجام داده و با ارائه روش‌های مختلف سعی بر شناسایی و تبیین ارتباط عناصر و عوامل اقلیمی با کشت و مراحل رشد و نموی محصولات داشته‌اند. عملکرد گیاهان زراعی تحت تأثیر ساختار ژنتیکی گیاه، شرایط محیطی و اثرات متقابل آن‌هاست. اگرچه تنش‌های زنده و غیرزنده از عوامل مهم کاهش تولید محسوب می‌شوند ولی، در حال حاضر میزان بارندگی و یا آب آبیاری، تشعشع و دما مهم‌ترین عوامل مؤثر در عملکرد گیاهان زراعی به‌شمار می‌روند (Entz & Fowler, 1990). برخی محققان عقیده دارند که، به‌دلیل شکل‌گیری کشاورزی اولیه در منطقه‌ی در خاورمیانه بین ایران و عراق، غلات از ابتدا تحت تأثیر خشکی قرار داشته‌اند (Araus et al., 2002). خشکی مهم‌ترین عامل غیر زنده‌ای است که، بر عملکرد گندم تأثیر دارد (Wood et al., 1997; Araus et al., 2002; Asadi et al., 2019). شرایط خاص اقلیمی کشور که خشکی و پراکنش نامناسب زمانی و مکانی بارندگی، واقعیت گریزناپذیر آن است، تولید هرگونه مواد غذایی و محصولات کشاورزی را منوط به استفاده صحیح و منطقی از منابع محدود آب نموده است. در این شرایط اقلیمی آب آبیاری مهم‌ترین نهاده تولید کشاورزی است (Ghaemi & Seyadat, 1994). در حال حاضر از کل منابع آب تجدید شونده کشور، حدود ۸۸/۵ میلیارد متر مکعب جهت مصارف بخش‌های کشاورزی، صنعت و معدن و شرب برداشت می‌شود که حدود ۸۳ میلیارد مکعب آن (۹۳ درصد) به بخش کشاورزی اختصاص دارد (Ehsani & Khalidi, 2003). بنابراین، با توجه به سهم زیاد مصرف آب در بخش کشاورزی، با انتخاب و به‌کارگیری راهکارهایی در زمینه بهبود روش‌های آبیاری، بالا بردن راندمان مصرف آب و بهینه سازی مصرف آب در گیاهان، می‌توان از صرفه‌جویی قابل توجه‌ای بهره برد (Boyer, 1992).

موضوع ارتقای بهره‌وری آب در تولید مواد غذایی از مسائل اساسی در کشورهای مختلف جهان و به‌خصوص کشورهای کم آب نظیر ایران است. متوسط سالیانه ارتفاع بارندگی در کشور ما در مقایسه با متوسط بارندگی جهان حدود ۰/۲۵ می‌باشد و کم‌تر از نصف بارندگی سالیانه آسیا است که با توجه به اقلیم خشک و نیمه خشک ایران بحران آب برای ما در مقایسه با سایر کشورها تهدیدی جدی‌تر محسوب می‌شود. امیرخانی (Amirkhani, 2010) گزارش کرد که در طول ۴۰ سال گذشته ۲۷ خشکسالی در ایران اتفاق افتاده است که خسارت‌آورترین آن‌ها در سال ۲۰۱۱ بوده است و ناظم‌السادات (Nazemosadat, 2010) خسارت وارده به بخش کشاورزی در این سال را حدود ۲۶ میلیارد دلار برآورد کرد.

منظور از راندمان مصرف آب (WUE) مقدار ماده خشک (محصول اقتصادی یا بیولوژیک) تولید شده به ازای هر واحد آب مصرف شده می‌باشد و معمولاً بر حسب گرم ماده خشک بر کیلوگرم بیان می‌شود (Boyer, 1992). هر چه اقلیم خشک‌تر باشد نیاز اتمسفری بیشتر بوده و برای تولید یک واحد ماده خشک، گیاه نیازمند از دست‌دادن آب بیشتری است. عوامل دخیل در کارآیی مصرف آب به سه گروه تقسیم می‌شوند که عبارتند از: عوامل اقلیمی که هم در مصرف آب (تبخیر و تعرق) و هم در تأمین آب (نزولات جوی) نقش اساسی دارند، عملیاتی که به مدیریت زراعی بستگی دارند و عملیاتی که منجر به کاهش تبخیر از سطح خاک می‌شوند (Kafi & Mahdavi Damghani, 2001). تاکنون تلاش‌ها به افزایش سطح زیر کشت معطوف بوده است، درصورتی‌که در شرایط محدودیت منابع آب باید هدف بالا بردن تولید به ازای هر واحد آب مصرفی و استفاده بهینه از منابع محدود آب باشد (Izadi, 2001). از آن‌جایی که عملکرد گیاهان زراعی مختلف متفاوت است، تبخیر و تعرق یا آب مصرفی آن‌ها نیز با یکدیگر برابر نمی‌باشد، در نتیجه نسبت تولید ماده‌ی خشک به آب مصرفی در آن‌ها تغییرات زیادی را نشان می‌دهد. حتی در مورد یک گیاه خاص هم، مقدار ثابتی نبوده و تحت تأثیر شرایط جوی و مدیریت زراعی متفاوت برای واریته‌های گوناگون گیاه کم و زیاد می‌شود (Ghaemi & Seyadat, 1994).

یکی از روش‌هایی که باعث بهبود بهره‌برداری آب و در نهایت،

۱- استاد گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.
۲- دانش آموخته دکتری، گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.
(*- نویسنده مسئول: Email: akooch@um.ac.ir)

DOI:10.22067/jag.v1i1.61172

افزایش راندمان مصــرف آب می‌شــود، برآورد دقیق تبخیر و تعرق یا تخمین میزان آب مصرفی گیاهان می‌باشد. تبخیر ـــ تعرق یکی از مولفه‌های اصــلی بیلان آبی هر منطقه و در نتیجه، یکی از عوامل کلیدی برنامه‌ریزی درسـت و مناسـب آبیاری می‌باشـد (Li, 2003; Bannayan et al., 2020). روش‌های محاسبه تبخیرـــتعرق پتانسیل در دو گروه تجربی و ترکیبی قرار می‌گیر ند. در روش های تجربی اســاس کار بر روی پارامتر دما قرار دارد و با اســتفاده از دمای محیط، تبخیرــــتعرق پتانسیل محاسبه می‌گردد. در روش‌های ترکیبی برای محاسبه تبخیرـ تعرق پتانسیل از دو فرآیند توازن انرژی و آیرودینامیک استفاده می شود. طی سال‌های اخیر روش‌های تجربی زیادی توسط متخصـصـان برای برآورد تبخیر و تعرق ارائه شـده‌اند که هر یک تابع متغییرهای اقلیمی خاصــی می‌باشـند. در نشــریه شــماره ۲۴ آبیاری و زهکشی فائو (FAO 56) برای کمک به کاربران با توجه به داده‌های موجود چهار روش بلانی‌ــکریدیل، تابش، پنمن و تشتک تبخیر برای محاسبه تبخیر ـــ تعرق پتانسیل ارائه شده است. در اغلب روش‌هایی که برای تعیین میزان تبخیر و تعرق ارائه شده‌اند، ابتدا مقدار تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET_o) تخمین زده می‌شــود و ســپس از روی آن تبخیر و تعرق گیاه مورد نظر محاسبه می شود (Alizadeh, 2004; Bannayan et al., 2020; Abdollahi et al., 2021). یکی از پارامترهای مهم در محاسبات نیاز آبی، ضریب رشد گیاهی (K_C) است که تغییرات آن به نوع گیاه، میزان رشـد و فصـل رویش گیاه بسـتگی دارد. با توجه به معیارهای پیشــنهادی نشــریه شــماره ۵۶ فائو، مقادیر ضریب رشد گیاهی در مراحل مختلف رویش برای کلیه گیاهان الگوی محاسبه می شود. نیاز آب گیاه از حاصل ضرب میزان تبخیر و تعرق پتانسیل در ضریب گیاهی (مراحل اولیه رشد، توسعه گیاه (اواسط دوره رشـد) و مراحل انتهایی رشـد) به‌دسـت می‌آید. ضـریب رشـد گیاهی منعکس‌کننده خصوصیات گیاهی در نیاز آبی آن می‌باشد. طبق تعریف ضریب رشد گیاهی عبارت است از نسبت تبخیر و تعرق محصول در شـرایط تولید حداکثر پتانسـیل به تبخیر و تعرق بالقوه. مقادیر ضـریب گیاهی بر حسب نوع گیاه، مرحله رشد، زمان کاشت و شرایط عمومی آب و هوایی شامل رطوبت متغیر می‌باشد.

باتوجه به مباحث فوق تعیین دقیق و علمی شـــاخص کارآیی مصرف آب فعلی در کشاورزی کشور و استفاده از روش‌های علمی و فنی مناسب مبتنی بر مطالعه و تحقیق، جهت افزایش کارآیی مصرف آب کشاورزی از ضروریات است. با بررسی‌های به عمل آمده مشخص گردیده است که در حال حاضر شاخص کارآیی مصرف آب محصولات زراعی مناطق مختلف در کشــور عملاً مشــخص نبوده و اندازه‌گیری‌های دقیق و معتبری در این زمینه در سطح مزارع و تحت شرایط مدیریت محلی کشاورزان کشور انجام نیافته و یا محدود بوده و کافی نمی‌باشند. از طرف دیگر، بیشتر منابع و داده‌های موجود متکی بر نتایج طرح‌های تحقیقاتی ایستگاهی و یا مرور منابع خارجی هستند. هدف از این مطالعه محاسبه نیاز آبی و کارآیی مصرف آب محصولات عمده زراعی استان خراسان رضوی در یک دوره‌ی بلندمدت ۲۶ ساله و سـپس بررسـی ارتباط بین کارآیی مصـرف آب و پارامترهای اقلیمی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

اســتان خراســان رضــوی با مســاحتی معادل ۱۱۸۸۵۱/۴۴ کیلومترمربع در بخش شمال شرقی کشور یکی از مناطق عمده تولید محصولات کشاورزی می‌باشد. گستردگی استان و عواملی همچون وجود رشــته کوه های مرتفع و مناطق کویری، دور از دریا و وزش بادهای مختلف موجب گوناگونی آب و هوا در این استان شده است. بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی آمبرژه استان دارای اقلیم خشک سرد و نیمه خشک سرد می‌باشد. بارش باران و برف در این استان در فصل سرد ســال با توزیع غیر نرمال اســت و به‌طور کلی، مقدار آن از شــمال به جنوب استان کاهش می‌یابد. بارش‌های سیل‌آسا، کوتاه‌مدت و رگباری قسمت عمده بارندگی‌های سالیانه را تشکیل می‌دهد. متوسط بارش سالانه این استان طی دوره آماری ۱۳۹۱-۱۳۶۸ حدود ۲۲۰ میلی‌متر می‌باشد، این در حالی است که متوسط بارندگی ایران ۲۳۶ میلی‌متر و متوسط بارش جهان ۷۸۰ میلی‌متر برآورد شده است. استان خراسان رضوی با متوسط بارشی در حدود یک چهارم متوسط بارش جهانی، یکی از قطب‌های تولیدکننده محصولات کشاورزی در ایران می‌باشد. در این شــرایط، تولید محصــولات کشــاورزی عمدتاً وابســته به آب زیرزمینی است (جدول ۱).

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های انتخابی در استان خراسان رضوی
Table 1 - Selected weather stations in Razavi Khorasan province

نام ایستگاه Station name	عرض جغرافیایی Latitude	طول جغرافیایی Longitude	ارتفاع از سطح دریا Above sea level (m)	میانگین دمای سالانه Mean annual temperature (°C)	مجموع بارندگی سالانه Total annual precipitation (mm)
تربت حیدریه Torbat-e Heyedariyee	'16° 35	'3° 59	1451	14.3	267.7
تربت جام Torbat-e Jam	'15° 35	'35° 60	951	15.7	172.8
چناران Chenaran	'29° 36	'17° 59	1176	13.5	208
سبزوار Sabzevar	'12° 36	'39° 57	972	17.5	186.6
قوچان Quchan	' 4° 37	'30° 58	1287	12.7	308.4
کاشمر Kashmar	'12° 35	'28° 59	1110	17.8	197.2
گناباد Gonabad	'21° 34	'41° 58	1056	17.4	137.4
مشهد Mashhad	'16° 36	'38° 59	999	14.3	251.5
نیشابور Sabzevar	'16° 36	'48° 57	1213	14.4	238.2

روش پژوهش

داده های اقلیمی مورد نظر برای برآورد ظرفیت تبخیر آب در دوره رشد گیاه زراعی از سازمان هواشناسی در یک دوره ۲۶ ساله از سال ۱۳۶۲ تا ۱۳۸۸ جمع‌آوری شد. این داده ها شامل دمای حداکثر و حداقل روزانه و بارش روزانه بود. با توجه به این که اطلاعات هواشناسی جهت محاسبه تبخیر و تعرق به‌روش پنمن-مانتیس برای تمامی سال‌های مورد نظر و در همه مناطق موجود نبود، برای محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع از معادله بلانی-کریدل استفاده شد معادله (۱).

$$ET_o = p(0.46\times T_{mean} + 8) \quad \text{معادله (۱)}$$

در این معادله، T_{mean}: میانگین درجه حرارت روزانه (سانتی‌گراد) و p: میانگین درصد روزانه ساعات آفتابی در سال می‌باشد. نیاز آبی گیاه زراعی در شرایط استاندارد از حاصل ضرب تبخیر و تعرق گیاه مرجع، در ضریب گیاهی، به‌دست می‌آید (معادله ۲).

$$CWU = K_c \times ET_o \quad \text{معادله (۲)}$$

در این معادله، CWU[1]: مقدار آب مصـــرفی گیاه زراعی، ET_o[2]، تبخیر و تعرق پتانســـیل و K_c[3]، ضـــریب گیاهی می‌باشـــند. یکی از پارامترهای مهم در محاسبات نیاز آبی، ضریب رشد گیاهی (K_c) است که تغییرات آن به نوع گیاه، میزان رشـد و فصـل رویش بسـتگی دارد (جدول ۲). سازمان جهانی خوار و بار کشاورزی فائو در نشریه شماره ۵۶، با توجه به معیارهای یاد شـــده، مقادیر ضـــریب رشـــد گیاهی در مراحل مختلف رشد برای اکثر گیاهان زراعی ارائه داده است. ضریب گیاهی کسری از تبخیر و تعرق پتانسیل است که توسط گیاه مورد نظر انجام می شود. این مقدار ارتباط زیادی به خصوصیات فیزیولوژیک و مرحله رشـــدی گیاه دارد. اگرچه تبخیر و تعرق هر گیاه زراعی در هر منطقه تغییر می کند، از آنجایی که خصـــوصـــیات اقلیمی هر منطقه در محاســـبه تبخیر و تعرق پتانســـیل لحاظ می‌شـــود، لذا ضـــریب گیاهی مستقل از مکان می‌باشد. بر همین اساس فائو ضرایب گیاهی و روش

1- Crop Water Use
2- Reference Evapotranspiration
3- Crop Coefficient

اســـتاندارد محاســـبه تبخیر و تعرق (فائو- پنمن- مانتیس) را برای استفاده در تمامی مناطق کره زمین ارائه داده است.

جدول ۲- ضریب گیاهی مفرد مراحل مختلف رشد گیاهان زراعی (فائو)

Table 2 - Single crop coefficients (Kc) of different stages of crop growth (FAO)

گیاه زراعی Crop	ضریب گیاهی Crop coefficient			حداکثر ارتفاع گیاه Maximum crop height (m)
	مرحله اولیه رشد The initial stage	مرحله میانی رشد The mid-season stage	مرحله انتهایی رشد The end of the late season stage	
گندم Wheat	0.15-0.5	1.15	0.25-0.4	1
جو Barley	0.3	1.15	0.25	1
پیاز Onion	-	1	1	0.3
چغندر قند Sugar Beet	0.35	1.2	0.705	0.5
سیب زمینی Potato	-	1.15	0.754	0.6
گوجه‌فرنگی Tomato	-	1.15	0.70-0.90	0.6
خیار Cucumber	0.6	1.002	0.75	0.3
هندوانه Water melon	0.4	1	0.75	0.4
یونجه Alfafa	0.4	0.95	0.90	0.7

محاســبه تبخیر و تعرق گیاه زراعی در طول دوره رشــد بر اساس تاریخ کا شت ارائه شده تو سط گزارش‌های جهاد ک شاورزی ا ستان و تاریخ برداشـــت بر اســـاس درجه روز مورد نیاز هر محصـــول تا زمان رسیدگی (GDD[1])، انجام شد. با توجه به عدم اطلاعات کافی در مورد ارقام کشــت شــده در بازه طولانی‌مدت (۲۶ سـال گذشــته) در مناطق مختلف اسـتان خراسـان رضـوی و عدم کشـت و دسـترسـی به ارقام قدیمی، امکان مطالعه و ا صلاح ضریب گیاهی آن ارقام وجود ندا شت. از این رو، برای محا سبه نیاز آبی گیاهان زراعی همانند سایر محققین از ضـریب گیاهی ارائه شـده فائو اسـتفاده شـد (Bhojaraja et al., 2015; Yea et al., 2015).

راندمان مصـــرف آب با توجه به نوع محصـــول از طریق تقســـیم عملکرد دانه، ماده خ شک اندام هوایی، مح صول تازه میوه و یا ری شه (SY) (گرم بر مترمربع) بر میزان کل تبخیر و تعرق (ET) (میلی‌متر) محاسبه شد (Ghosh et al., 2006).

معادله (۳) $WUE_{SY}=SY.ET^{-1}$

راندمان مصرف آب (WUE[2]) با توجه به داده‌های موجود به سطح زیر کشـــت و عملکرد گـنـدم (*Triticum avestivum* L.)، جو (*Hordeum vulgare* L.)، گـــوجـــه فـــرنـــگـــی (Solanum lycopersicum L.) و یونجه (*Medicago sativa*) در واحد ســطح محصولات کشاورزی برای یک دوره ۲۶ ساله از سال ۱۳۶۲ تا ۱۳۸۸ و ســـایر گیاهان شـــامل پیاز (*Allium cepa*)، چغندرقند (*Beta vulgaris*)، سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum*)، خیار (*Cucumis sativus*)، هندوانه (*Citrullus lanatus*) برای یک دوره ۲۲ ســاله از سال ۱۳۶۲ تا ۱۳۸۴ برای نه شهرستان یاد شده، محاسبه شد (جدول ۳).

آنالیز روند

تجزیه و تحلیل روند نشان‌دهنده تغییرات پارامترها در طول زمان

1- Growing degree days

2- Water Use Efficiency

است، که با استفاده از دو روش آماری آزمون پارامتری t تست و آزمون غیرپارامتری من- کندال انجام می‌شود. اگر چه کاربرد هر دو آزمون در بسیاری از موارد نتایج مشابه می‌دهد، امّا انوز و بایزت (Onoz & Bayazit, 2003) نشان دادند که آزمون غیرپارامتری من- کندال قدرت بیشتری در مقایسه با آزمون پارامتری t تست در نشان دادن توزیع احتمال چولگی دارد. در نتیجه، به‌منظور تشخیص هر گونه روند احتمالی در سری آماری متغیرهای اقلیمی، کارآیی مصرف آب و نیاز آبی گیاه آزمون غیرپارامتری من‌کندال به‌کار برده شد.

جدول ۳- سطح زیرکشت و عملکرد محصولات کشاورزی استان خراسان رضوی در سال زراعی ۸۹-۱۳۸۸

Table 3–Area cropland and yield of agricultural products in Khorasan Razavi province in 2009-2010

گیاه زراعی Crops		سطح زیرکشت Harvested area (ha)			تولید Yield (ton)			متوسط عملکرد The average yield (kg.ha^{-1})	
		آبی Irrigated	دیم Rainfed	کل Total	آبی Irrigated	دیم Rainfed	کل Total	آبی Irrigated	دیم Rainfed
غلات Cereals	گندم Wheat	260408	2458882	506289	838089	99617	937706	3218.4	405.1
	جو Barley	132335	24512	182846	450301	25912	476213	3402.7	512.99
گیاهان صنعتی Industrial plants	چغندر قند Sugar Beet	4\24732	0	24732	883427	0	883427	35720.0	0
نباتات علوفه‌ای Forage crops	یونجه Alfafa	23405	706	33111	259425	575	260182	4318.5	219385.8
سبزیجات Vegetables	سیب‌زمینی Potato	5816	0	5816	170616	0	170616	29335.6	0
	پیاز Onion	2136	0	2136	91057	0	91057	42637.6	0
	گوجه‌فرنگی Tomato	14439	0	14439	854821	0	584821	40502.8	0
محصولات جالیزی Cucurbits	هندوانه Water melon	13222	1348	14571	316289	3941	320230	23920.7	2922.7
	خیار Cucumber	2626	0	2626	40684	0	40684	15493.1	0

فرض صفر (H_0) آزمون من- کندال (MK) (Gilbert,1987; Mann, 1945; Kendall, 1975) بر تصادفی بودن و عدم وجود روند و فرض یک (H_1) مبنی بر وجود روند در سری داده‌ها می‌باشد. در ابتدا برای استخراج آماره S، اختلاف بین تک تک مشاهدات با یکدیگر با استفاده از معادله ۳ محاسبه می‌شود:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} sgn(X_j - X_i) \qquad \text{(۳) معادله}$$

که در آن، x_j: مقدار داده j ام، n: طول دوره آماری و sng(θ): تابع علامت می‌باشد که به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$sgn(\theta) = \begin{cases} +1 & \theta > 0 \\ 0 & \theta = 0 \\ -1 & \theta < 0 \end{cases} \qquad \text{(۴) معادله}$$

تحت فرضیه توزیع متغیرهای مستقل و تصادفی، وقتی $n \geq 8$، آمار S دارای توزیع نرمال با میانگین صفر بوده و واریانس آن به شرح زیر می‌باشد:

$$\sigma^2 = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \qquad \text{(۵) معادله}$$

در نهایت، آماره آزمون من- کندال یا آمار Z استاندارد به‌شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$Z = f(x) = \begin{cases} \frac{S-1}{\sigma} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sigma} & S < 0 \end{cases} \qquad \text{(۶) معادله}$$

فرض صفر به‌شرط $-Z_{1-\theta/2} \leq Z \leq Z_{1-\theta/2}$ پذیرفته می‌شود و در غیر این صورت H_0 رد و فرض H_1 (وجود روند در سری داده‌ها) پذیرفته می‌شود.

مدل

به‌دلیل حجم بالای داده‌ها و محدود بودن حجم مقاله اثر دما بر کارآیی مصرف آب، چهار گیاه زراعی از خانواده‌های متفاوت (گندم، یونجه، چغندرقند و گوجه‌فرنگی) مورد بررسی قرار گرفت. پس از نشان دادن رابطه بین عملکرد گیاهان زراعی با کارآیی مصرف آب و کارآیی

مصرف آب با نیاز آبی گیاه به‌صورت نمودار نقطه‌ای، یک خط چند جمله ای برای توصیف بهترین رابطه بین دو متغیر برازش داده شد (Casanova et al., 1999). برازش منحنی با عدم در نظر گرفتن داده‌های پرت انجام شد. سپس، خط اطمینان ۹۵ درصد بالا و پایین رسم شد. به‌طور کلی، فرض شد که این خط مرزی نشان‌دهنده حداکثر عملکرد در هر نقطه از نیاز آبی گیاه، و تفاوت بین دو خط، شکاف بین عملکرد واقعی و حداکثر عملکرد قابل دسترسی است. سپس، حداکثر عملکرد در هر نقطه از نیاز آبی گیاه به‌عنوان بالاترین عملکرد قابل دسترسی تعیین شد. در انتها، با توجه به این که نیاز آبی محاسبه شده، بر اساس نیاز آبی پتانسیل در طول دوره رشد بوده است، لذا افزایش دما به‌طور مستقیم بر نیاز آبی تأثیرگذار خواهد بود. به همین منظور سه سناریو افزایش دما (یک درجه سانتی‌گراد افزایش، دو درجه و سه درجه سانتی‌گراد افزایش دما) طراحی شد. با استفاده از معادله بلانی- کریدل، تأثیر افزایش دما بر نیاز آبی هر محصول محاسبه شد و اثر آن بر کارآیی مصرف آب بررسی شد.

لازم به ذکر است محاسبه ET_o و CWU به‌ترتیب با استفاده از نرم‌افزار Ref ET و CROPWAT 8 و تست من- کندال با نرم‌افزار r انجام شد.

نتایج و بحث

میانگین بلندمدت کارآیی مصرف آب

میانگین ۲۶ ساله کارآیی مصرف آب بر حسب عملکرد دانه غلات پاییزه گندم و جو حاکی از تشابه کارآیی مصرف آب دو گیاه در همه مناطق بود. میانگین کارآیی مصرف آب گندم در شهرهای کاشمر، گناباد و سبزوار (۰/۳۲، ۰/۳۵ و ۰/۳۹ کیلوگرم بر مترمکعب) و شهرهای تربت جام و چناران (۰/۵۹ و ۰/۵۳ کیلوگرم بر مترمکعب) به‌ترتیب کمتر و بیشتر از میانگین کارآیی مصرف آب استان (۰/۴۵ کیلوگرم بر مترمکعب) بود. این روند در جو نیز بین شهرستان‌ها مشاهده شد (جدول ۴ و شکل ۱). همچنین در این گیاهان به‌دلیل پاییزه بودن، بارندگی که در طول زمستان اتفاق می‌افتد جز آب مصرفی در کشت آن‌ها محسوب می‌گردد، در حالی‌که به‌دلیل خواب زمستانی استفاده‌ای از این منبع آبی برای افزایش تولید صورت نمی‌گیرد که همین امر موجب کاهش کارآیی مصرف آب آن‌ها در مقایسه با سایر گیاهان می‌شود.

کارآیی مصرف آب چغندرقند در چناران و تربت حیدریه (۳/۱۲ و ۳/۰۸ کیلوگرم بر مترمکعب) بیشترین انحراف را با میانگین استان (۲/۶۸ کیلوگرم بر مترمکعب) نشان داد. بیشترین کارآیی مصرف آب یونجه در چناران و نیشابور با ۱/۱ کیلوگرم بر مترمربع و کمترین آن در قوچان با ۰/۷۸ کیلوگرم بر مترمکعب مشاهده شد. در بین سبزیجات نیز سه شهر کاشمر، گناباد و سبزوار کمترین میزان کارآیی مصرف آب را دارا بودند. بیشترین کارآیی مصرف آب سیب‌زمینی، پیاز و گوجه‌فرنگی (۴/۱، ۴/۹ و ۴/۷ کیلوگرم بر مترمکعب) در چناران مشاهده شد. این افزایش به احتمال زیاد به‌دلیل پایین‌تر بودن میانگین دمای سالانه و فصلی مناطق می‌باشد. به‌گونه‌ای که کمترین کارآیی مصرف آب سیب‌زمینی، پیاز و گوجه‌فرنگی در سه شهر گناباد، کاشمر و سبزوار با بالاترین میانگین دمای سالانه به‌دست آمد (جدول ۴ و شکل ۱).

روند کارآیی مصرف آب محصولات جالیزی در شهرستان‌ها نسبت به سایر گیاهان متفاوت بود. کارآیی مصرف آب هندوانه در دو شهر مشهد و نیشابور و کارآیی مصرف خیار در مشهد نسبت به میانگین استان (به‌ترتیب ۲/۲۳ و ۵/۵۸ کیلوگرم بر مترمکعب) بیشتر بود. کمترین کارآیی مصرف آب خیار به‌میزان ۴/۸۹ کیلوگرم بر مترمکعب نیز در کاشمر مشاهده شد (جدول ۴ و شکل ۱). محصولاتی مانند خیار، گوجه‌فرنگی، هندوانه و پیاز که به‌صورت میوه تازه مصرف می‌شوند، وزن‌تر محصول به‌عنوان عملکرد در نظر گرفته می‌شود، بنابراین، در صورت کسر معادله کارآیی مصرف آب، عملکرد محصول تازه وارد شده و به‌دلیل داشتن رطوبت زیاد در محصول، کارآیی مصرف آب این گیاهان بالاتر رفته است. بالاترین میانگین کارآیی مصرف آب محصولات جالیزی در نیشابور و سایر گیاهان زراعی در چناران و تربت جام مشاهده شد.

دامنه تغییرات بلندمدت کارآیی مصرف آب گندم و جو در تمامی شهرهای نسبت به میانگین استان پایین بود. کاشمر، گناباد و مشهد در اکثر محصولات به‌دلیل دمای هوای بالاتر و بارندگی کمتر نسبت به سایر شهرها داری کارآیی مصرف آب پایین‌تر (انحراف معیار منفی) از میانگین استان می‌باشد. چناران و نیشابور نیز در اکثر محصولات به‌جز گندم و جو دارای بالاترین کارآیی مصرف آب (انحراف از معیار مثبت) نسبت به میانگین استان بود (شکل ۳). کارآیی مصرف آب تمام گیاهان مورد مطالعه در شهرستان‌های کاشمر، گناباد و سبزوار از میانگین کارآیی مصرف آب استان خرسان رضوی پایین‌تر می‌باشد (شکل ۱ و ۲).

جدول ٤- میانگین کارآیی مصرف آب برخی از محصولات کشاورزی استان خراسان رضوی برای یک دوره ٢٦ ساله (١٣٨٨-١٣٦٢)

Table 4- Long-term average of crop water use in Razavi Khorasan province for the period of 26 years (1984-2010)

نام ایستگاه Station name	غلات Cereals		گیاهان صنعتی Industrial plants	نباتات علوفه‌ای Forage crops	سبزیجات Vegetables			محصولات جالیزی Cucurbits	
	گندم Wheat	جو Barley	چغندر قند Sugar Beet	یونجه Alfalfa	سیب زمینی Potato	پیاز Onion	گوجه‌فرنگی Tomato	خیار Cucumber	هندوانه Water melon
تربت حیدریه Torbat-e Heydarieh	0.48	0.52	3.08	1.04	3.36	3.46	3.25	5.66	2.32
تربت جام Torbat-e Jam	0.59	0.56	2.95	0.92	4.05	3.53	4.49	5.20	2.23
چناران Chenaran	0.56	0.49	3.29	1.10	4.10	4.90	4.95	5.64	2.27
سبزوار Sabzevar	0.39	0.4	2.31	0.75	2.42	1.99	3.19	5.99	2.36
قوچان Quchan	0.49	0.5	2.80	0.78	3.25	3.28	3.88	5.53	2.32
کاشمر Kashmar	0.32	0.3	2.23	0.98	1.97	1.74	2.41	4.89	2.00
گناباد Gonabad	0.36	0.34	2.12	0.81	2.07	1.77	1.86	5.25	1.70
مشهد Mashhad	0.46	0.41	2.82	0.97	3.15	3.46	4.02	5.36	2.46
نیشابور Sabzevar	0.46	0.45	2.86	1.10	3.90	4.64	4.51	6.69	2.44
میانگین Mean	0.46	0.44	2.72	0.94	3.14	3.20	3.62	5.58	2.23

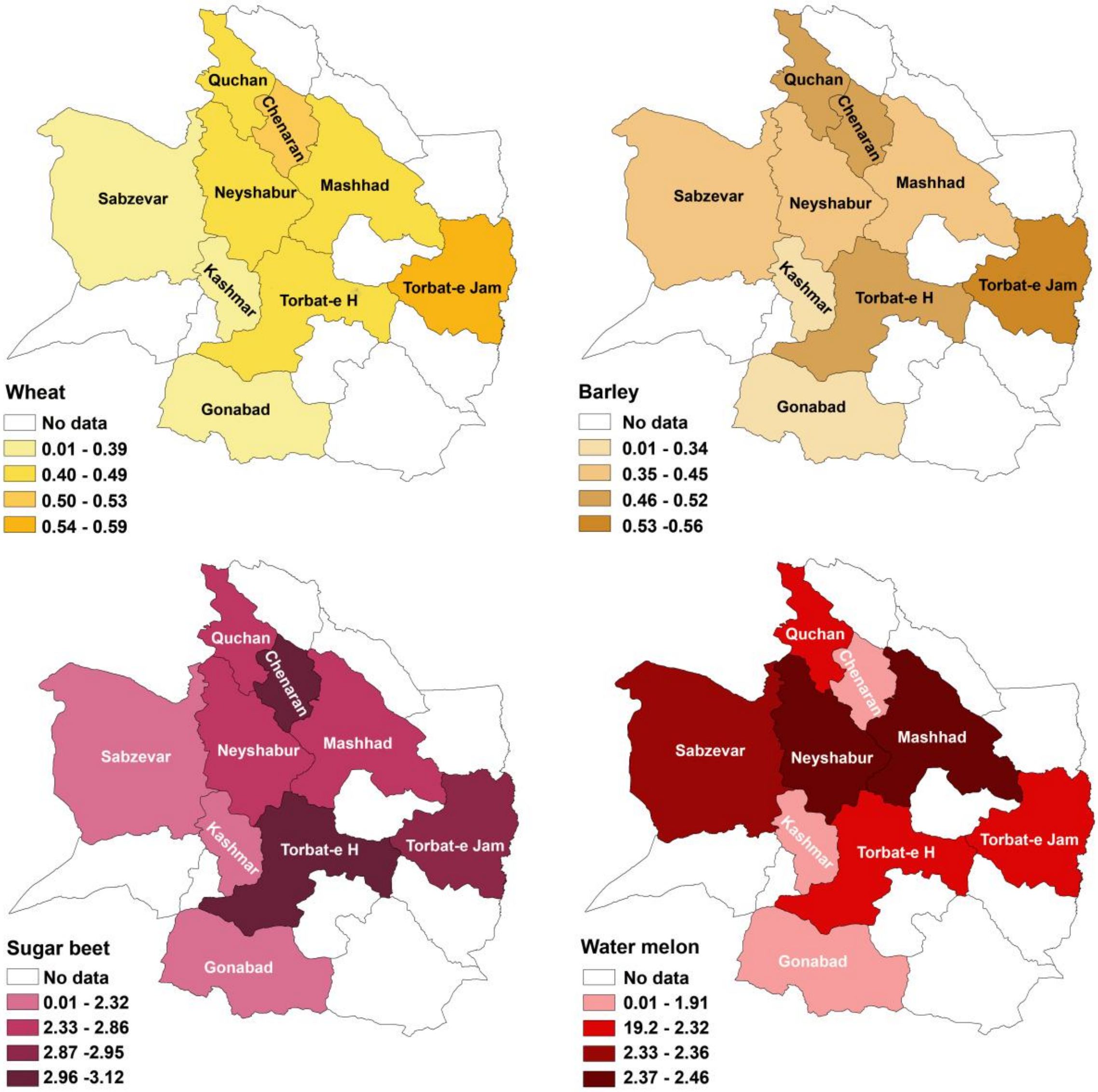
با توجه به شکل ۳ به نظر می‌رسد که دما یکی از عوامل تعیین‌کننده در کارآیی مصرف آب در این شهرستان‌ها می‌باشد، به این صورت که با افزایش میانگین دمای هوا، کارآیی مصرف آب کاهش یافته است. در واقع با افزایش دما تبخیر و تعرق زیاد شد، بنابراین به رطوبت بیشتری برای دستیابی به عملکرد مورد انتظار نیاز می‌باشد. میانگین بلندمدت عوامل اقلیمی نشان می‌دهد که شهرستان‌های شمالی استان دارای بارش‌های بیشتر و دمایی سردتر نسبت به شهرستان‌های جنوبی و غربی استان می‌باشد. بیشترین میانگین دمای هوا در سبزوار، کاشمر و گناباد و کم‌ترین آن در چناران و قوچان می‌باشد. بیشترین بارندگی در شهرستان قوچان و کم‌ترین در گناباد و تربت جام می‌باشد.

بهره‌وری آب گندم استان‌های مختلف کشور با استفاده از آمار درازمدت عملکرد و استفاده از مدل هیدرولوژی و بیلان آب به‌نام سوآت (برای تعیین تبخیر و تعرق) برآورد گردید (Faramarzi et al., 2010). براساس نتایج این تحقیق، بهره‌وری آب گندم آبی و دیم به‌ترتیب در دامنه‌های ۱/۵۵-۰/۱۵ و ۰/۷۵-۰/۲۸ کیلوگرم بر مترمکعب تغییر نموده و این دامنه تغییرات برای گندم دیم بیشتر بود (Faramarzi et al., 2010). بهره‌وری آب گندم در حوضه کرخه با استفاده از مدل کراپ ـ سیست (CropSyst) برای دوره‌های خشک، عادی و تر تعیین و پهنه‌بندی شد. براساس نتایج، بهره‌وری آب گندم در مقیاس حوضه آبریز، برای دوره‌های خشکسالی، عادی و ترسالی به‌ترتیب ۰/۶۲، ۰/۵۹ و ۰/۵۳ کیلوگرم بر مترمکعب برآورد گردید (Momeni et al., 2008).

محاسبات تخمینی (مبتنی بر آمار و ارقام و نتایج حاصل از طرح ملی در زمینه تعیین راندمان آبیاری)، کارآیی مصرف آب آبیاری محصولات زراعی مختلف در روش‌های آبیاری سطحی با مدیریت زارعین در مناطق اصفهان، گلستان، خراسان، خوزستان (دزفول) و آذربایجان غربی و برای محصولات گندم جو، سیب زمینی به‌ترتیب ۰/۸۴-۰/۳۴، ۱/۰، ۲/۷۲ کیلوگرم بر مترمکعب گزارش نموده است (Heidari & Haghayeghi Moghadam, 2001). در یک بررسی دیگر، مقادیر کارآیی مصرف آب ۱۰ محصول زراعی انتخابی با استفاده از نتایج ۶۷ طرح تحقیقاتی انجام شده طی سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۶ در

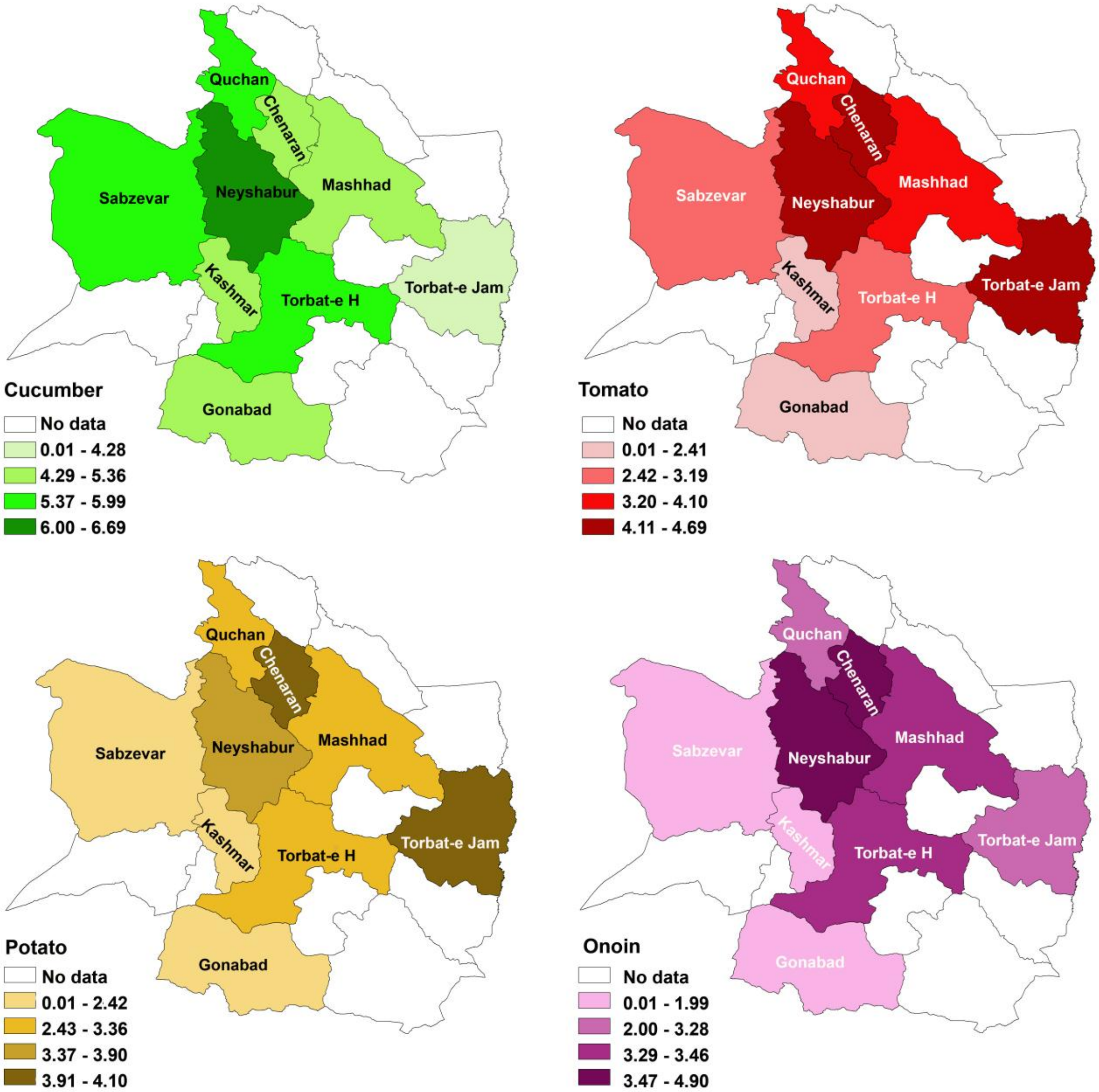
ایستگاه‌های تحقیقاتی ۱۳ استان کشور تعیین گردید. براساس نتایج این بررسی، متوسط کارآیی مصرف آب گندم، جو، برنج، چغندرقند، ذرت، پنبه (بذر)، یونجه، سیب زمینی، گوجه‌فرنگی و کنجد به‌ترتیب ۱/۶۲، ۲/۳۷، ۰/۴۲، ۱/۱۷، ۰/۶۱، ۰/۸۹، ۲/۷۴، ۶/۷۷ و ۰/۱۱ کیلوگرم بر مترمکعب بود (Montazar & Kosari, 2007). صادقی (Sadeghi, 2012) نیز کارآیی و بهره‌وری مصرف آب گندم، چغندرقند، سیب زمینی را به‌ترتیب ۰/۷، ۲/۵، ۱/۴ کیلوگرم در مترمکعب گزارش نمود.

فرامرزپور و همکاران (Faramarz Pour et al., 2012) در بررسی کارآیی مصرف آب خیار را در شرایط گلخانه در حدود ۵/۳ کیلوگرم در مترمکعب برآورد کردند. نجفی علیشاه و همکاران (Najafi Alshah et al., 2013) دامنه تغییرات کارآیی مصرف آب در دور آبیاری ۳، ۶ و ۹ هفته از ۹/۷ تا ۵/۴ گرم به‌ازای هر لیتر آب برآورد کردند و همچنین بیان نمودند که با استفاده از سطوح هیدروژل می‌توان کارآیی مصرف آب خیار را افزایش داد.



شکل ۱– میانگین بلندمدت کارآیی مصرف آب برخی از محصولات زراعی استان خراسان رضوی (سال ۸۸-۱۳٦۲)

Fig. 1 - Long-term average of crop water use efficiency in Razavi Khorasan province (1984-2010)



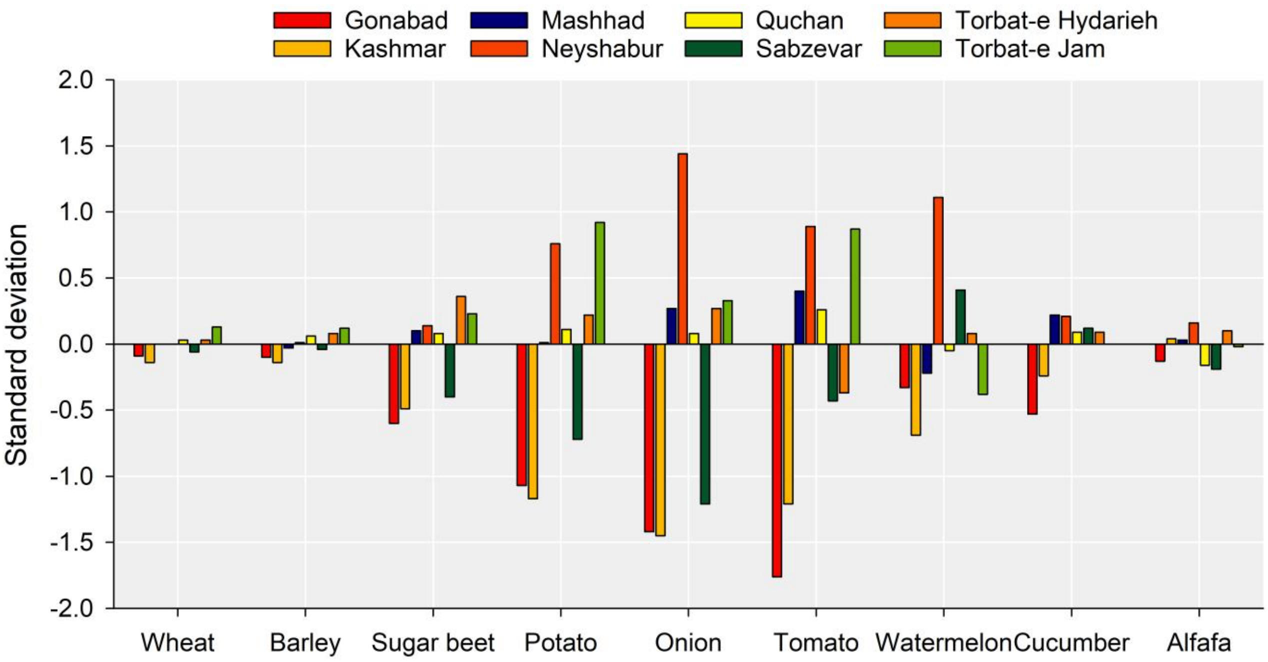
ادامه شکل ۱– میانگین بلندمدت کارآیی مصرف آب برخی از محصولات زراعی استان خراسان رضوی (سال ۸۸-۱۳۶۲)

Fig. 1- Long-term average of crop water use efficiency in Razavi Khorasan province (1984-2010)

بررسی روند تغییرات کارآیی مصرف آب در استان خراسان رضوی

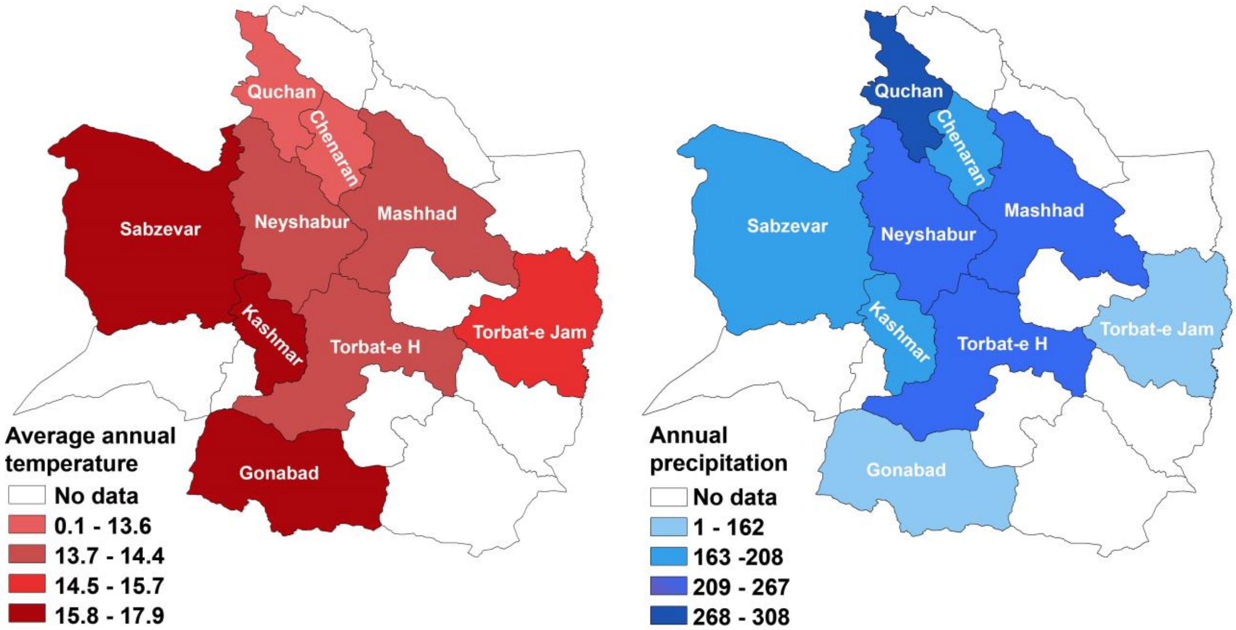
گندم و جو

روند تغییرات بلندمدت کارآیی مصرف آب گندم در شهرستان‌های استان خراسان متفاوت بود (شکل ۵). دامنه تغییرات بلندمدت کارآیی مصرف آب گندم در این استان از ۰/۱۸ کیلوگرم بر مترمکعب در کاشمر تا ۰/۷۷ کیلوگرم بر مترمکعب در چناران بود. میانگین کارآیی مصرف آب در تربت‌جام، چناران، قوچان و تربت حیدریه به‌ترتیب ۰/۵۹، ۰/۵۶، ۰/۴۹ و ۰/۴۸ کیلوگرم بر مترمکعب بودند. کارآیی مصرف آب گندم دو شهرستان نیشابور و مشهد مشابه میانگین کارآیی مصرف آب بلندمدت استان (۰/۴۶ کیلوگرم بر مترمکعب) بود. کارآیی مصرف آب در سال‌های اولیه در تمامی شهرستان‌ها پایین‌تر از میانگین بلندمدت استان بود، ولی با گذر زمان کارآیی مصرف آب با شیبی ملایم در حال افزایش است.



شکل ۲- انحراف معیار کارآیی مصرف آب محصولات کشاورزی از میانگین استان خراسان رضوی (۱۳۸۸-۱۳۶۲)

Fig. 2- Standard deviations from the mean water use efficiency for different crops in Khorasan Razavi province (1984-2010)

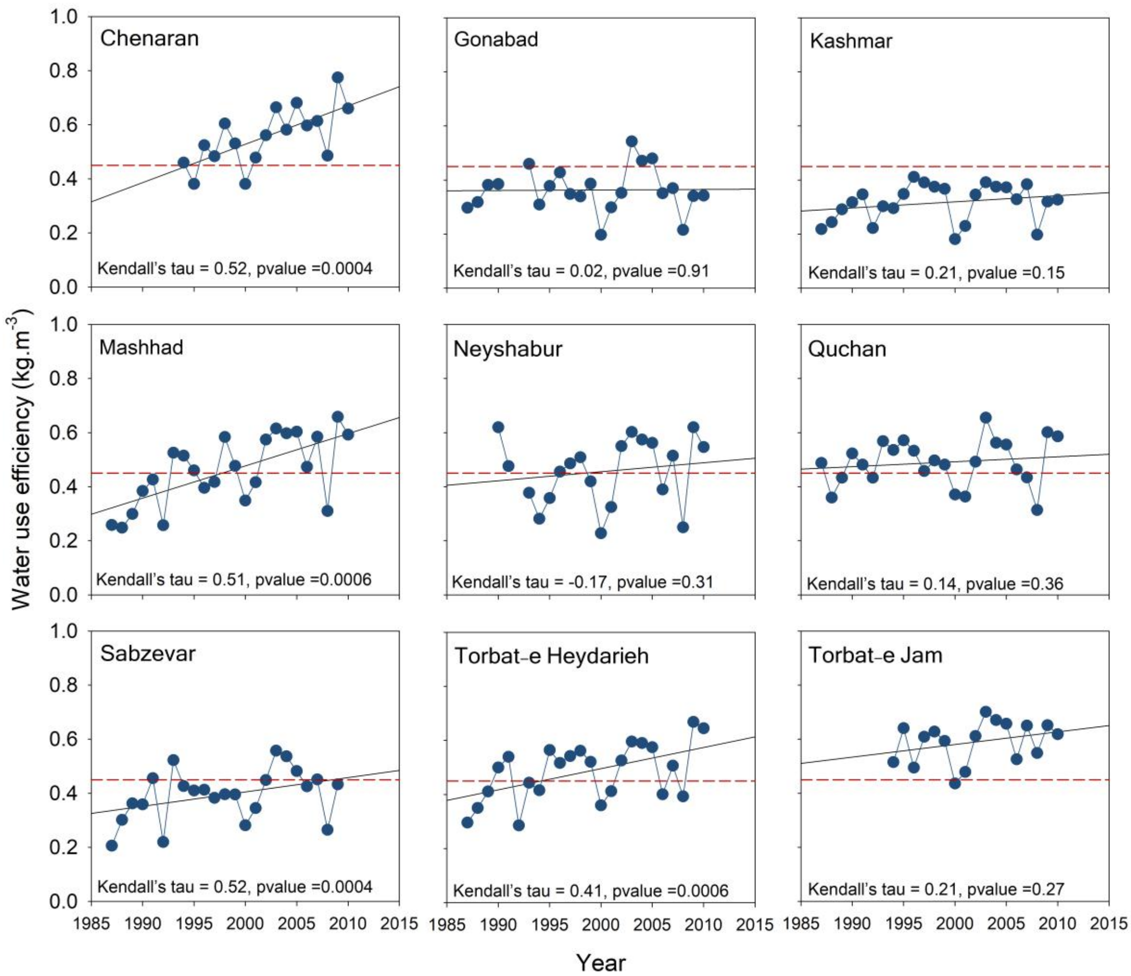


شکل ۳- میانگین بلندمدت عناصر اقلیمی (دما و بارش) در نقاط شهرستان‌های استان خراسان رضوی (۱۳۸۸-۱۳۶۲)

Fig. 3- The long-term average of climatic parameters (temperature and precipitation) in Razavi Khorasan province (1984-2010)

روند افزایشی معنی‌داری کارآیی مصرف آب در بلندمدت تنها در شهرهای مشهد، چناران، تربت‌حیدریه و سبزوار (p<0.01) مشاهده شد. کارآیی مصرف آب در شهرهای گناباد، کاشمر، نیشابور و قوچان روندی ثابت دارد. در سال‌های ۷۸ و ۸۶ در تمامی شهرستان‌ها افت محسوس کارآیی مصرف آب در گندم دیده می‌شود که می‌توان دلیل آن را به عوامل اقلیمی ارتباط داد، زیرا این تغییر در کلیه شهرهای استان اتفاق افتاده و بر کارآیی مصرف آب گیاه گندم تأثیر گذاشته است. بیشترین کارآیی مصرف آب در بازه زمانی مورد نظر مربوط به چناران، مشهد و تربت‌جام بود. کم‌ترین مقدار کارآیی مصرف آب در شهرستان‌های کاشمر و نیشابور دیده شد. به‌طور کلی، کارآیی مصرف آب گندم در مناطق با متوسط درجه حرارت سالانه بالاتر (شکل ۳)، پایین‌تر است.

بر اساس مطالعه ۸۴ منبع تحقیقاتی مربوط به ۲۵ سال اخیر، میانگین شاخص کارآیی مصرف آب محصول گندم ۱/۰۹ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد و دامنه تغییرات آن بین ۱/۷-۰/۶ کیلوگرم بر مترمکعب گزارش شده است (Zwart & Bastiansen, 2004). شائوژانگ و همکاران (Shaozhong et al., 2000) با بررسی کارآیی مصرف آب کانوپی گندم زمستانه در شمال چین بر اساس نسبت محصول به تبخیر و تعرق اظهار داشتند که کارآیی مصرف آب (بر اساس زیست‌توده) گیاه گندم در مراحل پنجه‌زنی و استقرار تا ساقه رفتن و ساقه رفتن تا خوشه‌دهی، به‌ترتیب در دامنه‌های ۴/۰۳-۱/۳۷ و ۷/۰۳-۶/۴۱ کیلوگرم بر مترمکعب بود.



شکل ۵- بررسی روند کارآیی مصرف آب گندم (WUE) استان خراسان رضوی با استفاده از آزمون من- کندال (۱۳۸۸-۱۳۶۳)

Fig. 5- Trend analysis of wheat water use efficiency (WUE) by Mann-Kendall test from 1985 to 2010

خطوط منقطع قرمز و توپر مشکی به‌ترتیب نشان‌دهنده متوسط کارآیی مصرف آب استان و خط رگرسیون می‌باشند.

The dashed red and solid black lines represent the average water use efficiency of the province and the regression line, respectively.

در واقع، حداکثر کارآیی مصرف آب در مرحله خوشه‌دهی اتفاق می‌افتد و سپس شروع به کاهش می‌نماید. در تحقیقی در دشت آزادگان در جنوب حوضه آبخیز کرخه کارآیی مصرف آب گندم در ۶۰ درصد مزارع کشاورزان ۰/۳ تا ۰/۶ گزارش گردیده است (Absalan et al., 2010). حیدری (Heydari, 2011) میانگین کارآیی مصرف آب جو را در برخی نقاط کشور را ۰/۵۶ گزارش کرد که مطابق نتایج به‌دست آمده در این تحقیق می‌باشد.

چغندرقند

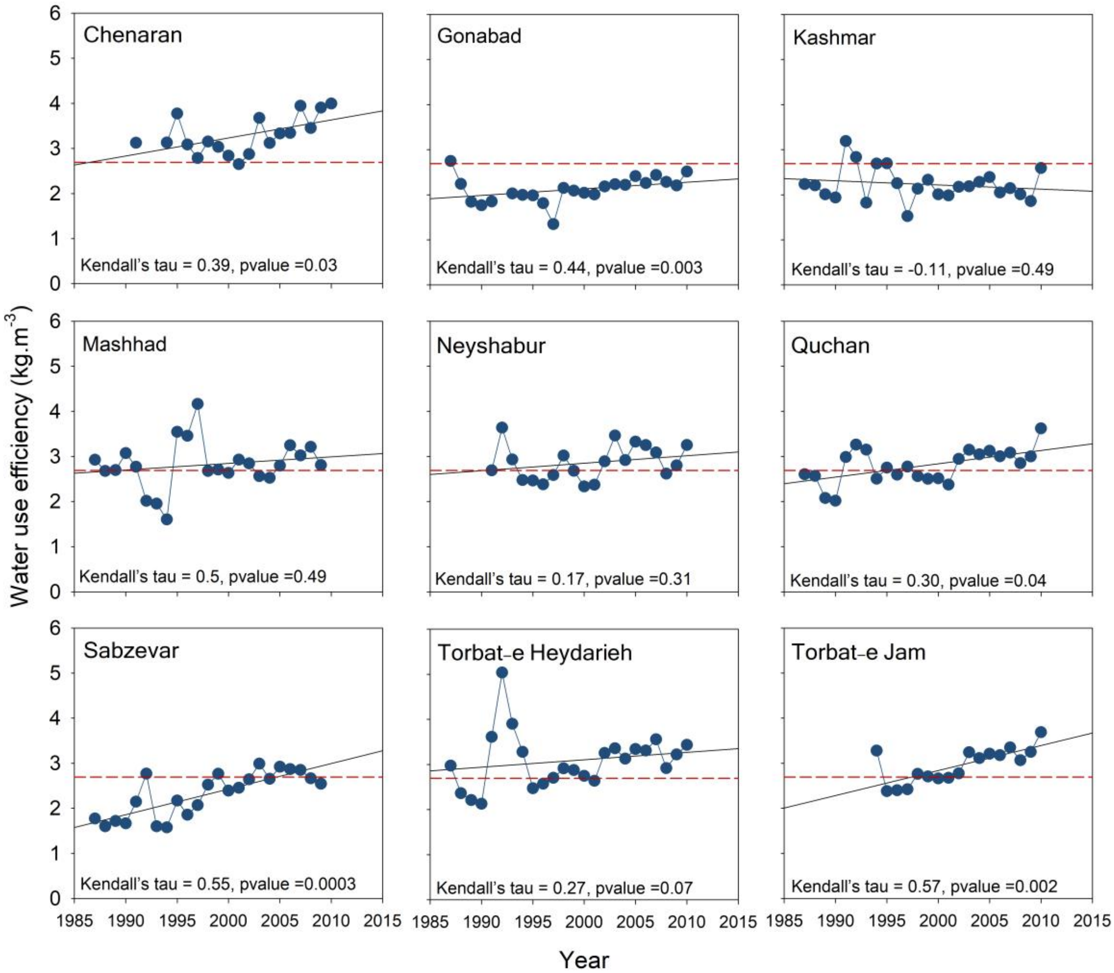
روند تغییرات بلندمدت کارآیی مصرف آب چغندرقند مانند گندم در سال‌های مختلف نوسان زیادی نشان نداد (شکل ۶). در طی بازه زمانی مورد مطالعه میانگین کارآیی مصرف آب در شهرهای سبزوار، کاشمر و گناباد از میانگین بلندمدت استان (۲/۷۲ کیلوگرم در مترمکعب) کمتر بوده است. روند کارآیی مصرف آب سبزوار، تربت جام، قوچان و چناران با شیب متوسطی در سال (به‌ترتیب ۰/۰۶، ۰/۰۶، ۰/۰۳ و ۰/۰۴) به‌طور معنی‌داری افزایش (pvalue<0.01) یافت. ولی در سایر شهرهای استان روند ثابتی داشته که در برخی از سال‌ها در شهرهای مشهد و کاشمر نوساناتی کوتاه‌مدت اتفاق افتاده است. تربت‌حیدریه، چناران و مشهد در اکثر سال‌ها بیشترین کارآیی و گناباد و کاشمر کم‌ترین مقدار را داشتند. دامنه تغییرات بلندمدت کارآیی مصرف آب چغندرقند در این استان از ۱/۳۵ در گناباد تا ۵/۰۳ در تربت‌حیدریه بود. بیشترین میانگین کارآیی مصرف آب چغندرقند استان در تربت‌حیدریه (۵/۰۳ کیلوگرم بر مترمکعب) به‌دلیل پایین بودن میانگین دما در سه ماه اول رشد گیاه (۵/۹۳) و دو ماه انتهایی رشد (۱۶/۱۰) نسبت به سایر سال‌ها بود. در سال‌های ۶۹ و ۸۱ در اکثر شهرستان‌ها بالاترین مقدار کارآیی مصرف آب مشاهده شد که به احتمال فراوان دلیل آن شرایط آب و هوایی به‌وجود آمده در طی این سال‌ها می‌باشد که شرایطی را مهیا کرده و مقدار کارآیی افزایش یافته است. حیدری (Heydari, 2011) مقدار متوسط کارآیی مصرف آب برای گیاه چغندرقند در کل کشور را ۴/۵۶ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب گزارش کرد که از مقدار به‌دست آمده در استان خراسان بیشتر می‌باشد. همچنین حقایقی مقدم و همکاران (Haghayeghi Moghadam, 2015) مقدار کارآیی مصرف آب چغندرقند پاییزه در منطقه مشهد را تحت سطوح و دور آبیاری متفاوت محاسبه کردند و مقدار آن‌را برای چغندرقند در شرایط آبیاری ۱۰۰ درصد حدود ۲/۴ کیلوگرم بر مترمکعب گزارش کردند. بهتر است کارآیی مصرف آب به‌ازای عملکرد قند تولیدی محاسبه شود. دامنه کارآیی مصرف آب چغندرقند و نیشکر بر اساس شکر به‌ترتیب ۱/۷– ۰/۲۹ و ۰/۴۴– ۰/۲۵ کیلوگرم شکر بر مترمکعب آب مصرفی توسط حیدری (Heydari, 2011) گزارش گردید. حیدری‌پور و همکاران (Heydari et al., 2014) نیز اظهار داشتند که کارآیی مصرف آب چغندرقند در مشهد تحت سطوح آبیاری۱۰۰ و ۷۵ درصد به‌ترتیب ۲/۷ و ۲/۶ کیلوگرم در مترمکعب بود.

گوجه‌فرنگی

دامنه تغییرات بلندمدت کارآیی مصرف آب گوجه‌فرنگی از ۱/۲۱ در گناباد تا ۶/۱ کیلوگرم بر مترمکعب در نیشابور بود (شکل ۷). کارآیی مصرف آب این محصول در قوچان، مشهد و سپس تربت‌جام و تربت‌حیدریه به‌ترتیب با شیبی ۰/۲، ۰/۱، ۰/۱ و ۰/۱ در سال در حال افزایش بود، به‌طوری‌که کارآیی مصرف آب در قوچان از ۱/۹۴ کیلوگرم بر مترمکعب در سال ۱۹۸۷ به ۴/۷۳ کیلوگرم بر مترمکعب در سال ۱۳۸۸ و در مشهد از ۳/۲۹ کیلوگرم بر مترمکعب در سال ۱۹۸۷ به ۴/۴۹ کیلوگرم بر مترمکعب در سال ۱۳۸۸ افزایش یافت. اگرچه چناران دارای کارآیی مصرف آب بالایی بود، امّا تغییرات قابل ملاحظه‌ای در طول زمان نداشت. احتمالاً، افزایش درجه حرارت در مناطقی مانند قوچان و چناران منجر به افزایش طول فصل رشد و عملکرد شده است. روند کارآیی مصرف آب در شهرستان‌های تربت‌حیدریه، سبزوار و نیشابور نوسانات فراوانی داشته که در برخی سال‌ها افزایشی و برخی دیگر کاهشی است.

به‌طور کلی، روند افزایشی کارآیی مصرف آب گوجه‌فرنگی در تمامی شهرستان‌ها به‌جز گناباد، کاشمر و سبزوار معنی‌دار (pvalue<0.01) بود. کارآیی مصرف آب گوجه‌فرنگی در طول دوره در دو شهر گناباد و کاشمر از میانگین کارآیی مصرف آب استان بر خلاف سایر استان‌ها پایین‌تر بود. شیب تغییرات کارآیی مصرف آب گوجه‌فرنگی در سبزوار هم‌راستا و پایین‌تر از میانگین استان قرار داشت. به نظر می‌رسد این کاهش به‌دلیل دمای بالاتر این سه شهر و میانگین بالاتر میزان آب مصرفی (گناباد، کاشمر و سبزوار به‌ترتیب ۸۳۴، ۸۴۲ و ۸۵۶ میلی‌متر) نسبت به سایر شهرها (میانگین سایر شهرها ۷۶۳ میلی‌متر) باشد. در طی محاسبات تخمینی مبتنی بر آمار و ارقام کارآیی

مصرف آب گوجه‌فرنگی در مناطق اصفهان، گلستان، خراسان، خوزستان و آذربایجان ۳/۳۳ گزارش شد (Heidari & Haghayeghi Moghadam, 2001) که تا حدودی مشابه مقدار به‌دست آمده برای برخی از مناطق استان می‌باشد.



شکل ٦- بررسی روند کارآیی مصرف آب چغندرقند (WUE) استان خراسان رضوی با استفاده از آزمون من- کندال (۱۳۸۸-۱۳٦۳)

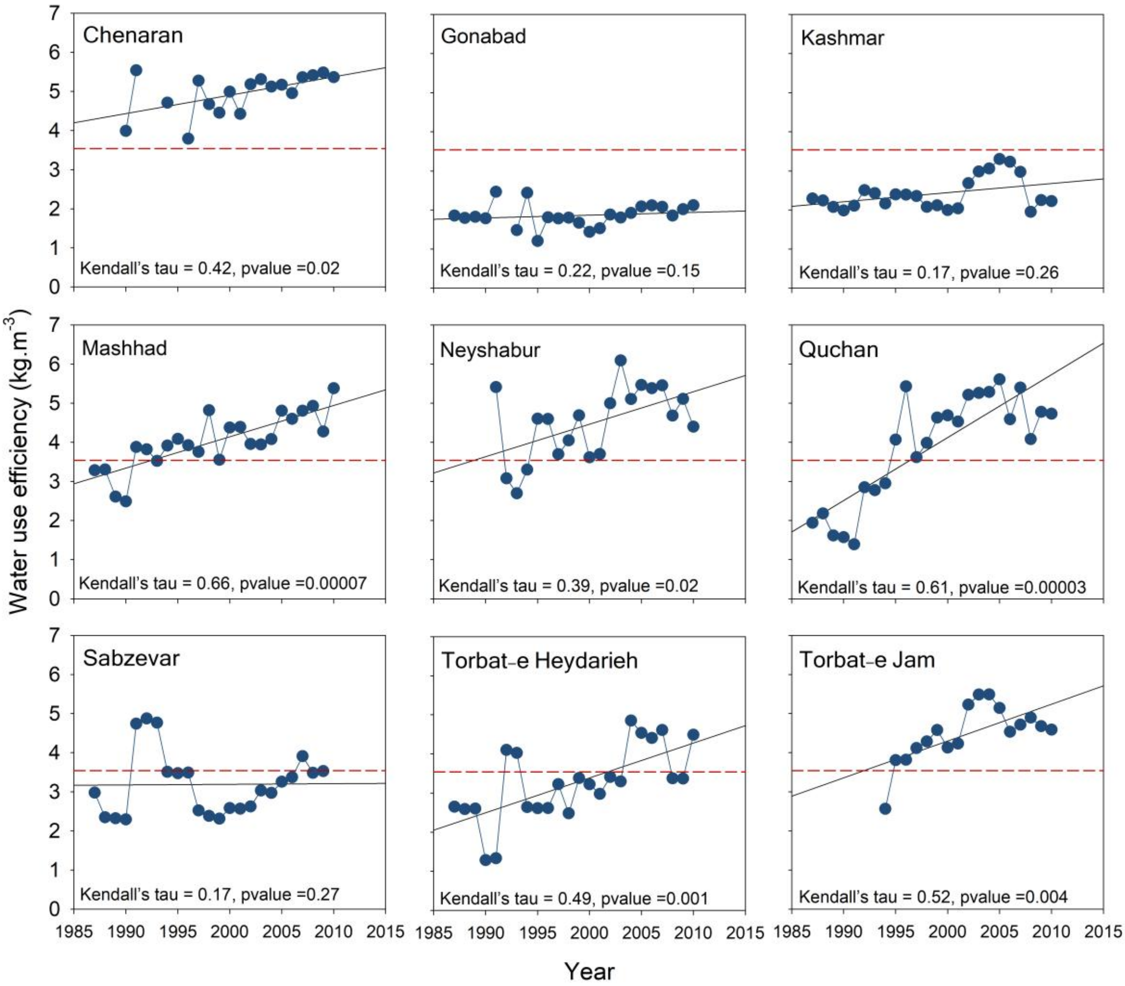
Fig. 6- Trend analysis of suger beet water use efficiency (WUE) by Mann-Kendall test between 1985 and 2010

خطوط منقطع قرمز و توپر مشکی به‌ترتیب نشان‌دهنده متوسط کارآیی مصرف آب استان و خط رگرسیون می‌باشند.

The dashed red and solid black lines represent the average water use efficiency of the province and the regression line, respectively.

اکبر نودهی و همکاران (Akbar Nohi et al., 2013) در بررسی سطوح مختلف آبیاری بر کارآیی مصرف آب گوجه‌فرنگی در مازندران بیان نمودند که بیشترین کارآیی مصرف آب گوجه‌فرنگی در شرایط آبیاری ۱۰۰ درصد در هر دو سال آزمایش (به‌ترتیب ۹/۵ و ۸/۹ کیلوگرم در مترمکعب) به‌دست آمد، و بازه تغییرات کارآیی مصرف آب گوجه‌فرنگی در سطوح مختلف آبیاری این تحقیق ۴/۸ تا ۸/۹ کیلوگرم در مترمکعب بود. بازه کارآیی مصرف آب گوجه‌فرنگی رقم سیندا در مطالعه گلخانه‌ای تحت تأثیر سطوح مختلف آب ۳ تا ۴/۷ کیلوگرم در مترمکعب برآورد شد (Rahimi et al., 2014). کارآیی مصرف آب در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد، آبیاری قطره‌ای زیر سطحی به‌ترتیب ۷/۲ و ۷/۹ کیلوگرم در مترمکعب گزارش شد. این در حالی است که کارآیی مصرف آب گوجه‌فرنگی در شرایط عدم استفاده از خاک‌پوش پلاستیکی (۶/۱ کیلوگرم در مترمکعب) در مقایسه با استفاده از خاک‌پوش پلاستیک در حدود دو کیلوگرم در مترمکعب کاهش یافت (Jolaini, 2011). محمدی و همکاران (Mohammadi et al., 2010) نیز در آزمایش مشابهی در کرج کارآیی مصرف آب گوجه‌فرنگی را ۷/۶

کیلوگرم در مترمکعب برآورد کردند و بیان کردند که افزایش تنش خشکی و شوری منجر به کاهش کارآیی مصرف گوجه‌فرنگی می‌شود. کارآیی مصرف آب گوجه‌فرنگی در صفی‌آباد دزفول در شرایط عدم کمبود آب ۸/۷ کیلوگرم در مترمکعب برآورد شد، که این میزان با کاهش سطح آبیاری به ۱۱/۴ کیلوگرم در مترمکعب رسید، البته میزان کارآیی مصرف آب گوجه‌فرنگی (۴/۴ کیلوگرم در مترمکعب) در شرایط استفاده از آبیاری جویچه‌ای کاهش معنی‌داری یافت (Khorramian, 2014).



شکل ۷- بررسی روندکارآیی مصرف آب گوجه‌فرنگی (WUE) استان خراسان رضوی با استفاده از آزمون من- کندال (۱۳۸۸-۱۳۶۳)

Fig. 7- Trend analysis of tomato water use efficiency (WUE) by Mann-Kendall test from 1985 to 2010

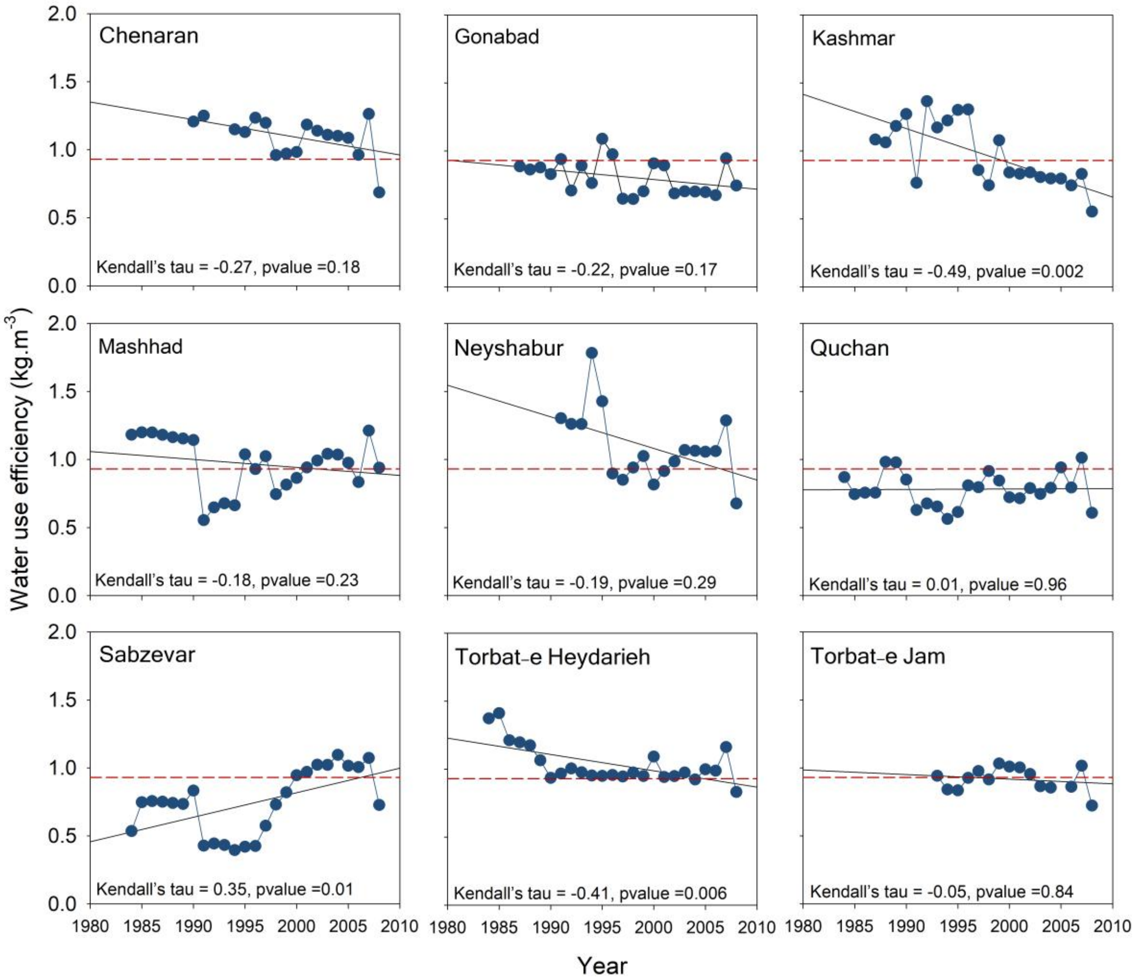
خطوط منقطع قرمز و توپر مشکی به‌ترتیب نشان‌دهنده متوسط کارآیی مصرف آب استان و خط رگرسیون می‌باشند.

The dashed red and solid black lines represent the average water use efficiency of the province and the regression line, respectively.

یونجه

میانگین بلندمدت کارآیی مصـــرف آب یونجه در اســـتان ۰/۹ کیلوگرم ماده خشـــک در مترمکعب بود (شـــکل ۸). دامنه تغییرات بلندمدت کارآیی مصـــرف آب یونجه از ۰/۴ کیلوگرم ماده خشـــک در مترمکعب در ســـبزوار تا ۱/۸ کیلوگرم ماده خشـــک در مترمکعب در نیشابور بود. روند تغییرات کارآیی مصرف آب یونجه با سایر محصولات زراعی متفاوت بود. تنها کارآیی مصـــرف آب یونجه در ســـبزاور در بلندمدت، روند افزایشی معنی‌داری ($p \leq 0.01$) داشت. کارآیی مصرف آب یونجه در سایر شهر روند کاهشی داشته به‌گونه‌ای که در سال‌های انتهایی از میانگین ا ستان هم کمتر شد. امّا این روند کاه شی تنها در کاشـــمر و تربت حیدریه معنی‌دار ($p \leq 0.01$) بود (شـــکل ۸). بازه تغییرات کارآیی مصـــرف آب یونجه خوزســـتان در دور آبیاری کم و

آبیاری سنگین به‌ترتیب ۰/۴۹ تا ۲/۱۱ کیلوگرم در هکتار علوفه خشک به‌ازای هر مترمکعب آب بود (Khorramian et al., 2012). مقایسهٔ سه چهار تیمار آبیاری پس از تخلیه ۹۰، ۷۰، ۵۰ و ۳۰ در صد رطوبت قابل اســتفاده خاک نشــان داد که آبیاری پس از ۵۰ درصــد تخلیه مجاز رطوبت با ۱۹ آبیاری و حجم آب مصرفی ۱۲۹۶۵ مترمکعب در هکتار و کارآیی مصرف آب آبیاری علوفه خشک ۱/۱ کیلوگرم در مترمکعب از سایر تیمارها برتر بود (Dehghani et al., 2005; Kizer, 2002). نیشــابوری و صــادقی (Nyshaboury & Sadeghi, 2003) نیز بیشترین کارآیی مصرف آب را چین دوم یونجه در حدود ۱/۱ کیلوگرم بر مترمکعب در تیمار ۵۰ درصـد آب قابل دسـترس در منطقه ریشـه برآورد کرد.



شکل ۸- بررسی روندکارآیی مصرف آب یونجه (WUE) استان خراسان رضوی با استفاده از آزمون من- کندال (۱۳۸۸-۱۳۶۳)

Fig. 8- Trend analysis of alfalfa water use efficiency (WUE) by Mann-Kendall test between 1985 and 2010

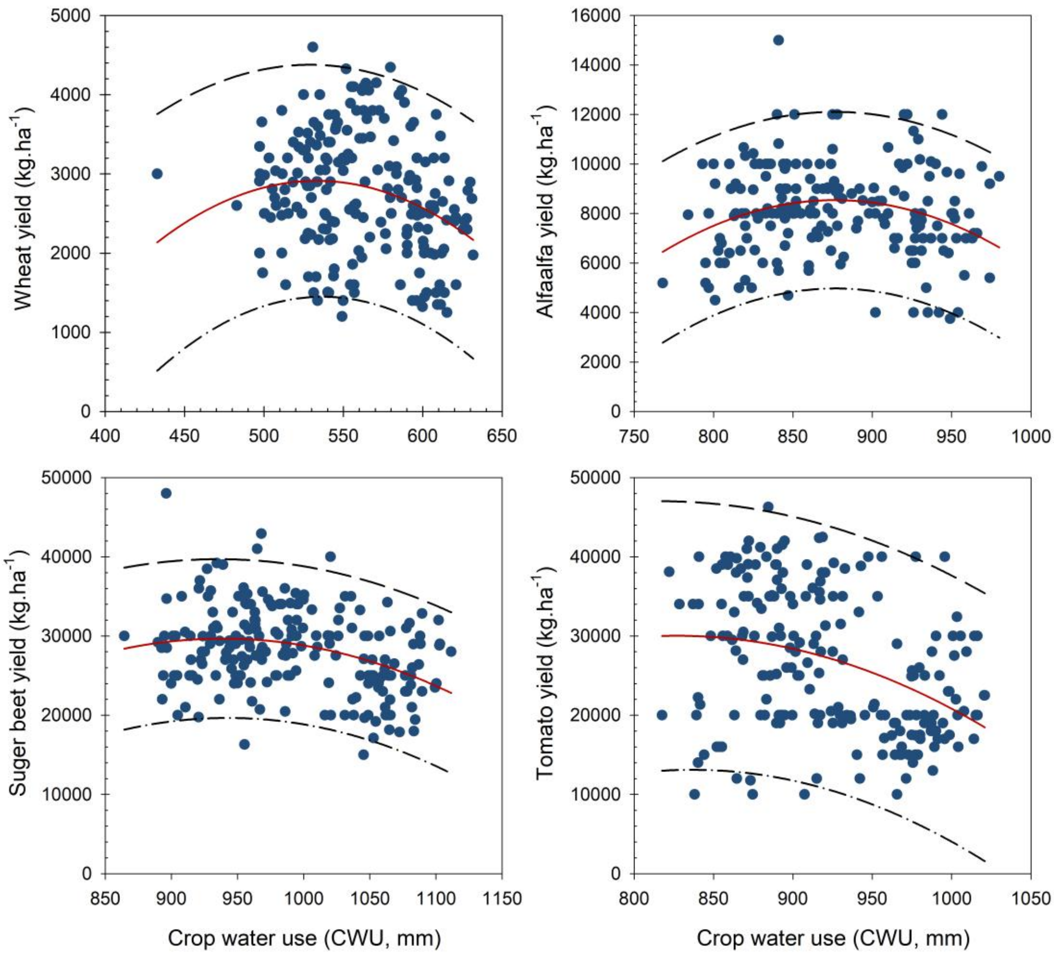
خطوط منقطع قرمز و توپر مشکی به‌ترتیب نشان‌دهنده متوسط کارآیی مصرف آب استان و خط رگرسیون می‌باشند.

The dashed red and solid black lines represent the average water use efficiency of the province and the regression line, respectively.

تأثیر افزایش دما بر عملکرد و کارآیی مصرف آب

با توجه به یافته‌های دیگران مبنی بر رابطه معکوس بین عملکرد و تقاضــای تبخیر در گیاهان زراعی، عملکرد چهار محصــول گندم، یونجه، چغندرقند و گوجه‌فرنگی در مقابل نیاز آبی آن‌ها در اســتان خراسـان رضـوی در شـکل ۹ به تصـویر کشـیده شـد (Sadras & Angus, 2006). همان‌طور که مشـاهده می‌شـود، عملکرد گیاهان دارای نوسانات زیادی در یک مقدار آب ثابت می‌باشند. بهترین منحنی برای نشــان‌دادن تغییرات عملکرد گیاهان در هر مقدار آب مصــرفی

برازش داده شـده اسـت (خطوط ممتد مشـکی) و برای محدود کردن بالاترین و کم ترین مقدار عملکرد در نیاز آبی منحنی لایه مرزی (بازه ۹۵ درصـد اطمینان بالا و پایین) نیز برازش داده شـده اسـت (خطوط نقطه‌چین). به‌این ترتیب عملکرد محصـــولات به ســـه گروه مجزا تقسیم‌بندی شده است. گروه اول بالاترین عملکرد را در هر مقدار نیاز آبی دارند (بالاترین خط در هر نمودار). گروه دوم نشـان‌دهنده عملکرد متوسط و گروه سوم نشان‌دهنده کمترین عملکرد بر نیاز آبی می‌باشد. بنابراین، منحنی نشـــان دهنده حد بالایی عملکرد، همان عملکرد پتانسیل قابل دسترس بر اساس نیاز آبی پتانسیل می‌باشد. لذا فاصله عمودی بین حد بالایی عملکرد و حد پایینی بیانگر خلأ عملکرد (عملکرد قابل دسترس) در استان خراسان رضوی می‌باشد. در هر گروه با افزایش نیاز آبی پتانسیل عملکرد محصولات افزایش می‌یابد و به بالاترین مقدار خود می‌رسـد و سـپس با افزایش بیشـتر نیاز آبی پتانسـیل، عملکرد کاهش می یابد. بالاترین عملکرد در ۵۴۰، ۸۸۰، ۹۴۰ و ۸۵۰ میلی‌متر نیاز آبی پتانسیل برای گندم، یونجه، چغندرقند و گوجه‌فرنگی به‌دست آمد. با توجه به این که نیاز آبی برای هر محصول به‌وسیله تبخیر و تعرق پتانسیل محاسبه شده است، لذا تفاوت عملکرد بین هر ســه گروه در یک مقدار نیاز آبی، نشــان‌دهنده مدیریت‌های متفاوت در هر مزرعه می‌باشد. تاریخ کاشت، کود دهی، مقدار آبیاری (Oweis & Hachum, 2009) و رقـم (Oweis et al., 2002)، مهم‌ترین منابع تغییرات عملکرد می‌باشد.



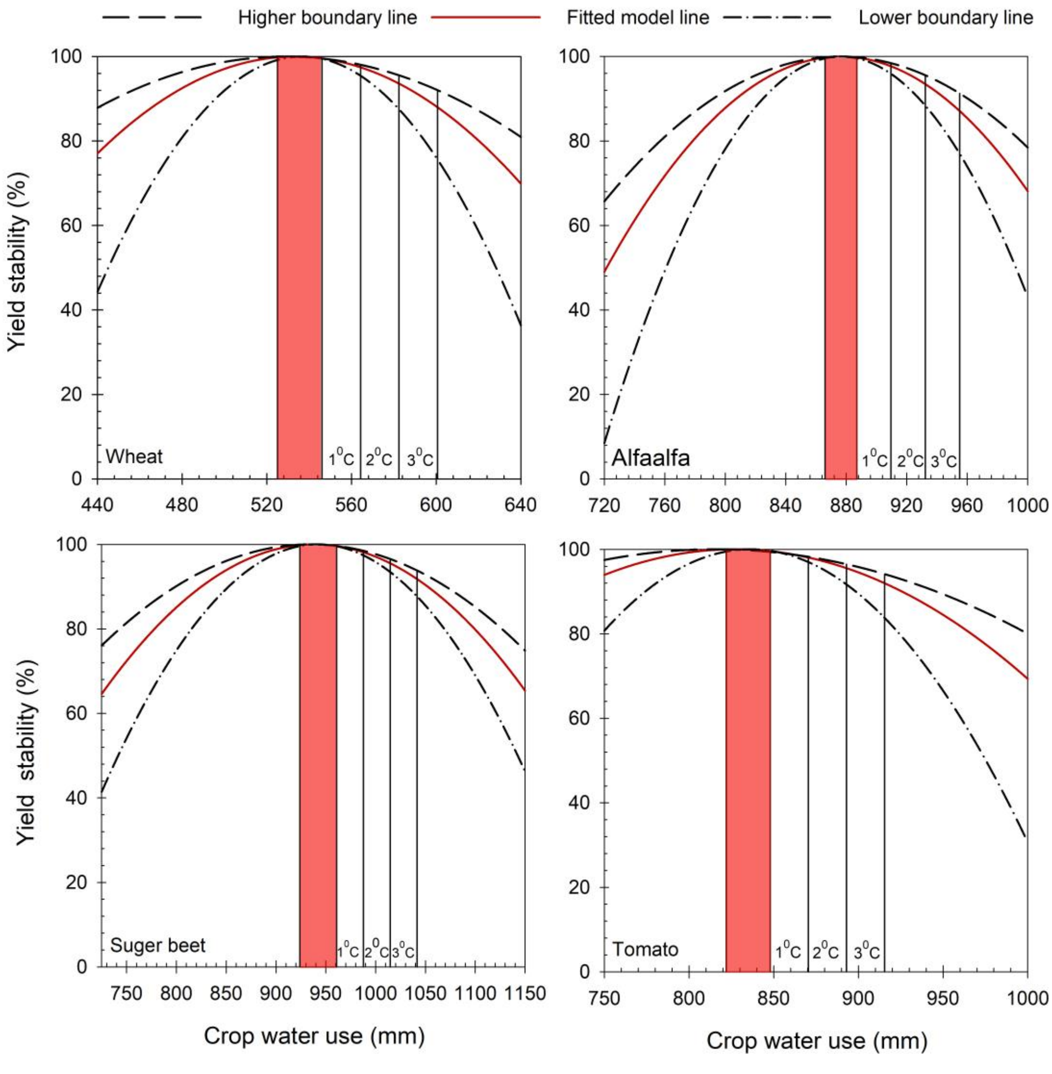
شکل ۹- تغییرات عملکرد گندم، یونجه، چغندرقند و گوجه‌فرنگی در مقابل میزان آب مصرفی

Fig. 9 - Yield changes in wheat, alfalfa, sugar beet and tomatoes versus water use

خطوط منقطع نشان‌دهنده لایه مرزی بالا و پایین و خطوط قرمز توپر نشان‌دهنده مدل برازش داده شده می‌باشد.

The dashed lines represent the upper and lower boundary lines and the solid red lines represent the fitted model.

مقدار نیاز آبی بهینه، مقدار نیاز آبی اســـت که در آن حداکثر عملکرد هر محصول به‌دست می‌آید. نیاز آبی بهینه برای هر سه مدل برازش داده شـده یکسـان بود. از آن‌جایی‌که نیاز آبی هر محصـول بر اساس تبخیر و تعرق پتانسیل و ضریب گیاهی هر محصول محاسبه شده است و از طرفی، تبخیر و تعرق پتانسیل به‌روش بلانی- کریدل محاسـبه شـده اسـت، لذا افزایش و کاهش نیاز آبی به‌معنی افزایش و کاهش دما در طول دوره رشـد می‌باشـد. شـکل ۱۰ تأثیر افزایش دما (نیاز آبی) را بر ثبات عملکرد در هر یک از سه مدل برازش داده شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می شود افزایش نیاز آبی تأثیر متفاوتی بر کاهش عملکرد در هر سـه گروه و هر یک از محصـولات دارد. با افزایش یک درجه دما در طول دوره رشـد عملکرد در هر سـه مدل به‌مقدار خیلی ناچیزی کاهش می یابد و تفاوتی بین سـه مدل مشاهده نمی‌شود. در حالی‌که با افزایش بیشتر دما اختلاف بین مدل‌ها بارز می‌شود.



شکل ۱۰- تغییرات ثبات عملکرد گندم، یونجه، چغندرقند و گوجه‌فرنگی تحت تأثیر میزان آب مصرفی و افزایش درجه حرارت (۱ تا ۳ درجه سانتی‌گراد)

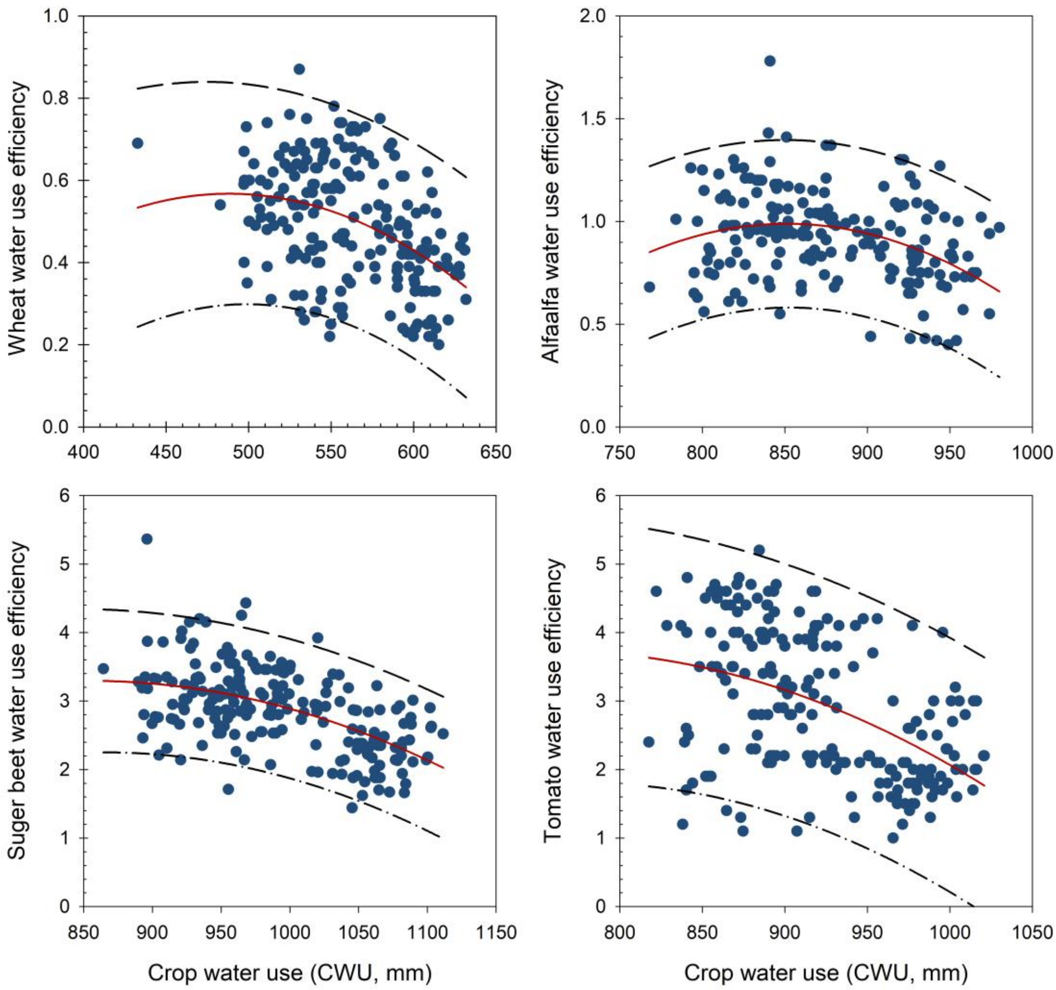
Fig. 10- Changes in yield stability of wheat, alfalfa, sugar beet and tomatoes under the influence of water use and increase in temperature (1 to 3 °C)

خطوط منقطع نشان‌دهنده لایه مرزی بالا و پایین و خطوط قرمز توپر نشان‌دهنده مدل برازش داده شده می‌باشد.

The dashed lines represent the upper and lower boundary lines and the solid red lines represent the fitted model.

کشاورزانی که در گروه عملکردی بالا قرار دارند، در مقابل افزایش دما مقاومت بیشتری نشان می‌دهند و عملکرد آن‌ها به‌مقدار کم‌تری کاهش می یابد. این در حالی است که کشاورزانی که در گروه عملکردی پایین قرار دارند در مقابل تغییرات دما حساسیت بیشتری داشته، به‌طوری‌که با افزایش سه درجه سانتی‌گراد دما عملکرد گندم و یونجه وگوجه‌فرنگی ۲۰ درصد و چغندرقند حدود ۱۷ درصد کاهش می‌یابد.

شکل ۱۱ پراکندگی کارآیی مصرف آب گندم، یونجه، چغندرقند و گوجه‌فرنگی را بر اساس نیاز آبی پتانسیل نشان می‌دهد. فاصله عمودی بین نقاطی که در یک مقدار مشخص نیاز آبی قرار دارند، بیانگر اختلاف بین کارآیی مصرف آب مزارعی هست که در شرایط یکسان قرار دارند. تفاوت بین روش‌های مختلف کشت و مدیریت زراعی دلیل اصلی اختلاف در کارآیی مصرف آب شده است. منحنی که با خط مشکی توپر نمایش داده شده است، مدل برازش داده شده برای نمایش روند تغییرات کارآیی مصرف آب در نیاز آبی پتانسیل می‌باشد و خطوط بالا و پایین آن، منحنی لایه مرزی بوده که برای نمایش بالاترین و کم‌ترین مقدار کارآیی مصرف آب، برازش داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص شده است، با افزایش نیاز آبی، کارآیی مصرف آب کاهش می‌یابد.



شکل ۱۱- تغییرات کارآیی مصرف آب در مقابل تأثیر میزان آب مصرفی

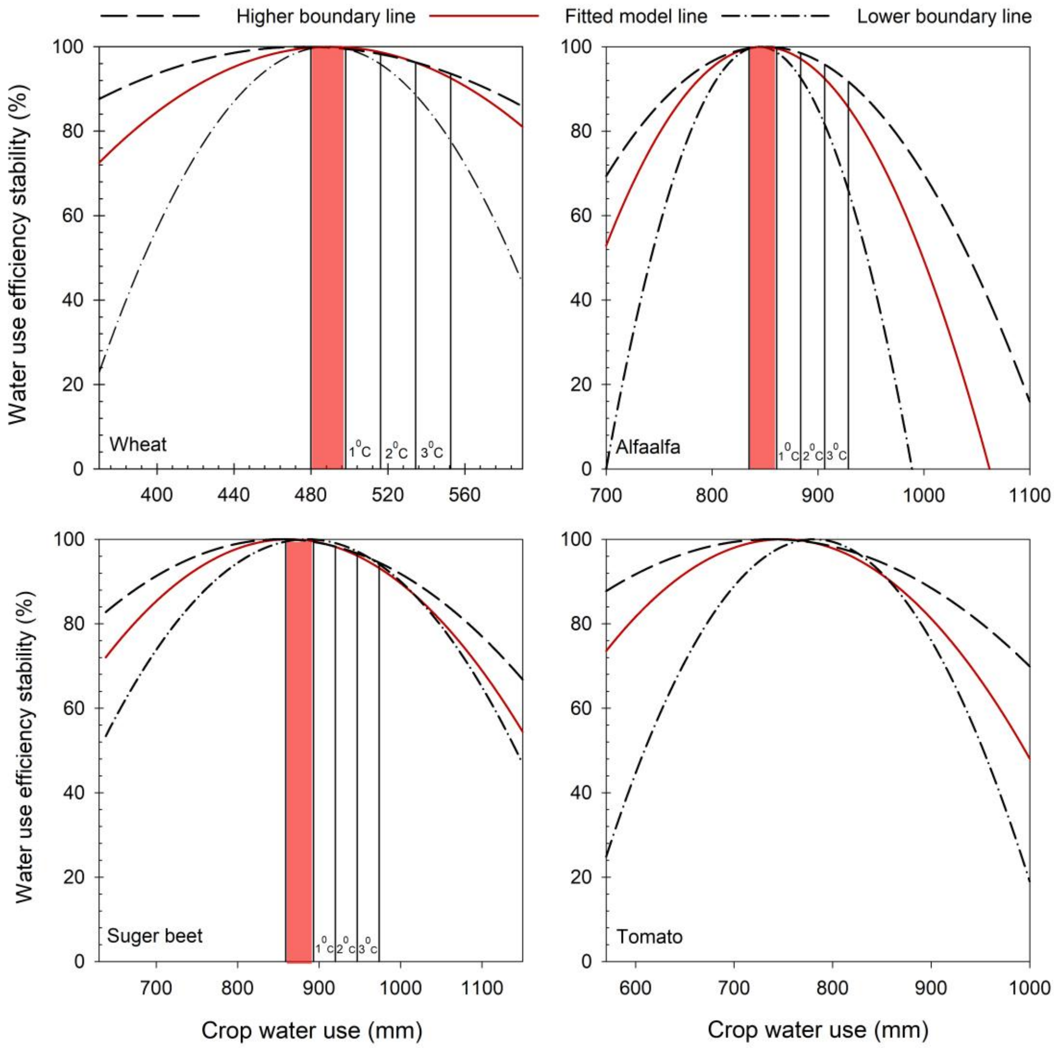
Fig. 11- Changes in water use efficiency versus water use

خطوط منقطع نشان‌دهنده لایه مرزی بالا و پایین و خطوط قرمز توپر نشان‌دهنده مدل برازش داده شده می‌باشد.

The dashed lines represent the upper and lower boundary lines and the solid red lines represent the fitted model.

بالاترین مقدار کارآیی مصـــرف آب برای گندم زمانی به‌دســـت می‌آید که نیاز آبی در حدود ۵۰۰ میلی‌متر در طول دوره رشد باشد و با افزایش و کاهش این مقدار، کارآیی مصـــرف آب کاهش می یابد. بهترین کارآیی مصـــرف آب برای یونجه در نیاز آبی ۸۵۰ میلی‌متر به‌دست آمد و مانند گندم، با افزایش و کاهش نیاز آبی کارآیی مصرف آب کاهش می یابد. کارآیی مصـــرف آب چغندرقند و گوجه‌فرنگی، با افزایش نیاز آبی کاهش یافت.

افزایش نیاز آبی به‌طور مستقیم با افزایش تبخیر و تعرق پتانسیل در ارتباط اســـت. با افزایش تبخیر و تعرق گیاهان در معرض تنش خشکی قرار گرفته و کارآیی مصرف آب کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، افزایش نیاز تبخیری محیط باعث افزایش نسبت تبخیر به تعرق شده و بدین طریق نیز کارآیی مصرف آب کاهش می‌یابد.



شکل ۱۲- تغییرات ثبات کارآیی مصرف آب گندم، یونجه، چغندرقند و گوجه‌فرنگی تحت تأثیر میزان آب مصرفی و افزایش درجه حرارت (۱ تا ۳ درجه سانتی‌گراد)

Fig. 12- Stability changes in water consumption efficiency of wheat, alfalfa, sugar beet and tomato under the influence of water use and increase in temperature (1 to 3 °C)

خطوط منقطع نشان‌دهنده لایه مرزی بالا و پایین و خطوط قرمز توپر نشان‌دهنده مدل برازش داده شده می‌باشد.

The dashed lines represent the upper and lower boundary lines and the solid red lines represent the fitted model.

حداکثر کارآیی مصرف آب برای هر سه مدل تقریباً در یک مقدار نیاز آبی به‌دست آمد. بالاترین کارآیی مصرف آب برای گندم، یونجه، چغندرقند و گوجه‌فرنگی در ۴۹۰، ۸۵۰، ۸۸۰ و ۷۸۰ میلی‌متر نیاز آبی به‌دست آمد (شکل ۱۲). با افزایش نیاز آبی کارآیی مصرف آب برای همه محصولات به‌صورت منحنی نزولی (با شیب متفاوت) کاهش یافت. همان‌طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، گروه سوم که دارایی کارآیی مصرف آب پایینی می‌باشد، به تغییرت نیاز آبی بسیار حساس بوده و با افزایش دما کارآیی مصرف آب این گروه با شیبی تند کاهش می‌یابد، به‌طوری‌که با افزایش سه درجه سانتی‌گراد دما در طول دوره رشد، کارآیی مصرف آب گندم و یونجه ۲۵ و ۴۰ درصد کاهش می‌یابد. در حالی که افزایش نیاز آبی تأثیر مخرب کم‌تری بر کارآیی مصرف آب در گروه دیگر می‌گذارد. از آن‌جایی که اختلاف بین دو گروه حد بالایی و پایینی کارآیی مصرف آب، با افزایش دما بیشتر می‌شود، به نظر می‌رسد با افزایش دما و تغییر اقلیم اختلاف بین کارآیی مصرف آب در مزارع و شهرستان‌های استان خراسان بیشتر خواهد شد.

دامغانی و همکاران (Damghani et al., 2005) نیز در مطالعه‌ای در مورد پایداری بوم‌شناختی نظام زراعی گندم و پنبه در استان خراسان بیان نمودند تلفات آب در سیستم آبیاری به شکلی است که بخش عمده‌ای از آب آبیاری یا از دسترس گیاه خارج است و یا صرف تولید محصول نمی‌شود، به شکلی که کارآیی مصرف آب در گندم ۰/۵ کیلوگرم در مترمکعب بوده است. استفاده از سیستم‌های آبیاری بارانی و قطره‌ای هرچند به‌دلیل ورود نهاده‌های خارجی و مصرف بالای انرژی در تولید و فعالیت آن‌ها، از یک طرف وابستگی نظام کشاورزی را افزایش می‌دهد، ولی افزایش کارآیی آبیاری در آن‌ها می‌تواند این نقیصه را جبران کند.

نتیجه‌گیری

برخی از گیاهان از جمله خیار و گوجه‌فرنگی بیشترین مقدار کارآیی مصرف آب را بین محصولات جالیزی و سبزیجات در استان خراسان رضوی داشتند. دامنه تغییرات بلندمدت کارآیی مصرف آب گندم و جو در تمامی شهرهای نسبت به میانگین استان پایین بود. کاشمر، گناباد و مشهد در اکثر محصولات و چناران و نیشابور نیز در اکثر محصولات به‌جز گندم و جو به‌ترتیب دارای پایین‌ترین و بالاترین کارآیی مصرف آب نسبت به میانگین استان بود. میزان آب مصرفی محصولات زراعی در کاشمر، گناباد و مشهد به‌دلیل دمای هوای بالاتر و بارندگی کمتر از میانگین استان بالاتر بود، به عبارت دیگر، در اقلیم‌های گرم و خشک، نیاز اتمسفری بیشتر بوده وگیاهان زراعی برای تولید یک واحد ماده خشک، به‌میزان آب مصرفی بیشتری نیازمند هستند. بخش زیادی از افزایش کارآیی مصرف گیاهان زراعی در طی سال در استان خراسان رضوی به‌دلیل افزایش قابل توجهی عملکرد این گیاهان در طی دهه‌های اخیر می‌باشد. این افزایش عملکرد بدون آن‌که تبخیر و تعرق فصلی افزایش یابد، به‌دست آمده است. بنابراین کارآیی مصرف آب همراه با افزایش عملکرد بالا رفته است. با توجه به این موضوع، در صورتی که بتوان محدودیت‌های رشد گیاهان از نظر مدیریت به‌زراعی و به‌نژادی را بدون توجه به تغییر در تبخیر و تعرق گیاه، به حداقل ممکن رساند، کارآیی مصرف آب گیاهان افزایش خواهد یافت. از جمله موارد قابل ذکر در مدیریت های به‌زراعی و به‌نژادی در افزایش کارآیی مصرف آب شامل زمان‌بندی مناسب در آبیاری، افزایش مقاومت گیاهان به تنش خشکی و اصلاح ارقام زراعی و کاشت گیاه در مناطق منطبق با نیاز دمایی و آبی می‌باشد.

تفاوت در مدیریت‌های مزرعه (مدیریت‌های در سطح بالا، متوسط و ضعیف) منجر به تولید عملکردهای متفاوت در یک مقدار نیاز آبی در بازه طولانی‌مدت در این استان شد. با افزایش یک درجه دما در طول دوره رشد گیاهان، اختلاف ناچیزی در عملکرد گیاهان استان در هر سه مدل مدیریت مشاهده شد. با افزایش بیش از یک درجه سانتی‌گراد در دما اختلاف بین مدل‌ها بارز شد. مزارعی با مدیریت بهتر، در مقابل افزایش دما مقاومت بیشتری نشان داده و برخلاف مزارعی با مدیریت ضعیف، درصد کاهش عملکرد آن‌ها کمتر می‌باشد. به‌طوری‌که با افزایش سه درجه سانتی‌گراد دما عملکرد گندم و یونجه و گوجه‌فرنگی ۲۰ درصد و چغندرقند حدود ۱۷ درصد کاهش یافت. با افزایش نیاز آبی کارآیی مصرف آب برای همه محصولات به صورت منحنی نزولی با شیب متفاوت کاهش یافت. همچنین، افزایش سه درجه سانتی‌گراد دما در طول دوره رشد، منجر به کاهش ۲۵ و ۴۰ درصدی کارآیی مصرف آب گندم و یونجه در مزارع با مدیریت ضعیف شد. از آن‌جایی که اختلاف بین دو گروه حد بالایی و پایینی کارآیی مصرف آب، با افزایش دما بیشتر می‌شود، به نظر می‌رسد با افزایش دما و تغییر اقلیم اختلاف بین کارآیی مصرف آب در مزارع و

شهرستان‌های استان خراسان بیشتر خواهد شد. به‌طور کلی، کارآیی مصـرف آب تا حد زیادی تحت تأثیر مدیریت زراعی می‌باشـد، زیرا از یک طرف عملکرد تابع مدیریت زراعی است و از طرف دیگر، مصرف آب و به‌کارگیری صحیح آن به مدیریت بستگی دارد و با اجرای تدابیر مدیریتی می‌توان به کارآیی مصرف آب بالا در تولید محصولات زراعی رسید. افزایش کارآیی مصرف آب در کشاورزی موضوعی استراتژیک اســت که باید در کشــور با توجه به مقادیر آب موجود در جهت بهره‌گیری از آن مورد توجه واقع شد.

سپاسگزاری

هزینه‌های مورد نیاز جهت انجام این طرح توسط معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده کشاورزی و در قالب طرح تحقیقاتی مصــوب با کد ۲/۲۸۳۷۳ مورخ ۱۳۹۳/۱۰/۲۴ تأمین شــده است که بدین وسیله از حمایت‌های مالی دانشگاه تشکر و سپاسگزاری می‌گردد.

References

Abdollahi, F., Jafari, L., and Asadi, S., 2021. Comparison of water Requirement of Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Fields of Hormozgan Province with other Southern Regions of Iran Using Time Series Analysis. Journal of Agroecology 12(4): 685-702. (In Persian with English Summary)

Absalan, N., Karim, M., Haidari, N., Dehghan, A., Abbasi F., and Rahimian, D.A., 2010. Determine and assess the efficiency of water use in the saline lands of Karkhe catchment area. Research Report No. 1267/89. Research Institute of Agricultural Engineering. (In Persian with English Summary)

Akbar Nodehi, D., Azizi Zohan A.A., and Rezaie Sokht Abndani, R., 2013. Investigate the relationship between water consumption and yield of tomato in Mazandaran. Water Research in Agriculture. 27(4): 503-512.

Alizadeh, A., Kamali, Gh.A., Khanjani, M.J., and Rahnavard, M.R. 2004. Evaluation of the accuracy of empirical method of estimating reference evapotranspirationq. Uarterly Geographical Research 19(2): 97-105.

Amirkhani, S., and Chizari, M. 2010. Factors influencing drought management in Varamin Township. Third Congress of Agricultural Extension and Natural Resources, Mashhad, Iran March 2010, p. 107–118. (In Persian with English Summary)

Araus, J.L., Slafer, G.A., Reynolds, M.P., and Royo, C., 2002. Plant breeding and drought in C_3 cereals: What should we breed for? Annals of Botany. 89: 925-940.

Asadi, S., Bannayan, M., and Monti, A., 2019. The association of crop production and precipitation; a comparison of two methodologies. Arid Land Research and Management 33(2), 155-176.

Bannayan, M., Asadi, S., Nouri, M., and Yaghoubi, F., 2020. Time trend analysis of some agroclimatic variables during the last half century over Iran. Theoretical and Applied Climatology 140(3), 839-857.

Bhojaraja, B.E., Hegde, G., Pruthviraj, U., Shetty, A., and Nagaraj M.K., 2015. Mapping agewise discrimination of arecanut crop water requirement using Hyperspectral Remote Sensing. Aquatic Procedia 4: 1437-1444.

Boyer, J.S. 1992. Plant productivity and environment. Science 218: 443-448.

Brouder, S.M., and Volenec, J.J., 2008. Impact of climate change on crop nutrient and water use efficiencies. Physiol. Plant. 133(4): 705–724.

Casanova, D., Goudriaan, J., Bouma, J., and Epema, G.F., 1999. Yield gap analysis in relation to soil properties in direct-seeded flooded rice. Geoderma 91: 191–216.

Dehghani, M., Aghdaie, M., and Maman Posh, A., 2005. Effect of irrigation on yield and water use efficiency and irrigation of Alfafa. Iranian Soil Science Congress 9^{th}. SSCI09_442. (In Persian with English Summary)

Ehsani, D., and Khalidi, H., 2003. Water productivity in agriculture. National Committee on Irrigation and Drainage. 82: 109-109. (In Persian with English Summary)

Entz, M.H., and Fowler, D.B., 1990. Differential agronomic responses of winter wheat cultivars to preanthesis environmental stress. Crop Science 30: 1119-1123.

FAO Irrigation and Drainage Paper. Crop Evapotranspiration. 2006. No. 56.

Faramarz pPour, A., Delshad, M., and Parsi Nejad, M., 2012. An evaluation of growth, yield and water use efficiency of greenhouse cucumber production at different soil moisture circumstances using tensiometer as moisture measuring instrument. Iranian Journal of Horticultural Science 43(3): 285-292.

Faramarzi, M., Yang, H., Schulin, R., and Abbaspour, K., 2010. Modeling wheat yield and crop water productivity in Iran: Implications of agricultural water management for wheat production. Agricultural Water Management 97(11): 1861-1875.

Ghaemi, M., and Seyadat, H., 1994. Final report project to study the effect of different moisture regimes in cotton fiber

yield. Publication No. 963 Research Institute of Soil and Water.
Ghosh, P.K., Manna, M.C., Bandyopadhyay, K.K., Ajay, Tripathi, A.K., Wanjari, R.H., Hati, K.M., Misra, A.K., Acharya, C.L., and Subba Rao. A., 2006. Interspecific interaction and nutrient use in soybean/sorghum intercropping system. Agronomy Journal 98: 1097-1108.
Gilbert, N. 2012. Water under pressure, Nature 483: 256–257.
Haghayeghi Moghadam, S.A., Alizadeh, A., Ahmadi, M., Bannayan, M., and Ansari, H., 2015. Effect of irrigation on water use efficiency of sugar beet fall in Mashhad. Journal of Agricultural Engineering Research 16(3): 15-30.
Heidari, N., and Haghayeghi Moghadam, S.A., 2001.The main products of irrigation water use efficiency in different areas. Report to the Department of Agriculture, Ministry of Agriculture. Research Institute of Agricultural Engineering. Karaj.
Heydari, N. 2011. Determination and evaluation of water use efficiency of some major crops under farmers management in Iran. Journal of Water and Irrigation Management. 1(2): 43.57.
Hydari Pour, R., Nassiri Mahallati, M., Koochaki, A., and Ahmad Feiz Abadi, A., 2014. Effects of water and nitrogen use efficiency and water productivity in corn (*Zea mays* L.) and sesame (*Sesamum indicum* L.), sugar beet (*Beta vulgaris* L.). Journal of Agroecology 6(2): 187-198.
Izadi, A. 2001. The effect of fractions of water on yield and yield components of two cotton cultivars introduced in hand. M.Sc. Thesis Ferdowsi University of Mashhad.
Jolaini, M. 2011. Investigation the effect of different water and plastic mulch levels on yield and water use efficiency of tomato in surface and subsurface drip irrigation method. Journal of Water and Soil 25(5): 1025-1023.
Kafi, M., and Mahdavi Damghani, M. 2001. Biological Seed and -Crop Production. Jahad-e Daneshgahi Mashhad Publications.
Kendall, M.G., 1962. Rank Correlation Methods. Hafner Publishing Company: New York.
Keshavarz, A., and Sadegh Zadeh, K., 2000. Water management in agriculture, Agricultural Engineering Research Institute. Publication No. 3.
Khorramian, M., 2014. Effect of Tape Irrigation levels on yield and quality of tomato in north of Khuzestan Province. Journal Management System. 38(2): 161-170.
Khorramian, M., Shoushi Dezfouli, A.A., and Asareh, A., 2012. Investigation the effect of gun sprinkle irrigation on forage yield and water use efficiency of alfalfa in Khuzestan. Crop Physiology Journal 4 (15): 87-97.
Kizer, M. 2002. Alfalfa Irrigation. Oklahama Cooperative Extension Service, E. 826. Chapter 6.
Li, Y.L., Cui, J.Y., Zhang, T.H., and Zhao, H.L., 2003. Measurement of evapotranspiration of irrigated spring wheatand maize in a semiarid region of North China. Agricultural Water Management 61:1-12.
Mann, H.B., 1945. Non parametric tests again trend. Econometrica 13: 245–259.
Mohammadi, M., Liaghat, A., and Molavi, H., 2010. Optimization of water use and determination of tomato sensitivity coefficients under combined salinity and drought stress in Karaj. Journal of Water and Soil. 24(3): 583-592.
Momeni, R., Behbahani, S.M.R., Nazary Far, M.H., and Azadegan, B., 2008. Zoning water productivity of wheat cropping system model in various water courses (Case study Karkhe catchment area). Iranian Journal of Irrigation and Drainage 2(1): 63-76. (In Persian with English Summary)
Montazar, A., and Kosari, H., 2007. Water productivity analysis of some irrigated crops in Iran. Proceeding of the international conference of water saving in Mediterranean agriculture and future needs. Valenzano (Italy). Series B. Etudes et Recherches, 56(1): 109-120. (In Persian)
Najafi Alishah, F., Golchin, A., and Mohebbi, M., 2013. The impact of superabsorbent and irrigation on yield, water use efficiency and growth indices Greenhouse cucumbers. Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture 15: 1-14.
Nazemosadat, M.J., 2010. Winter drought in Iran: association with ENSO. Drought Netw. News 13, 1.
Nyshaboury, M., and Sadeghi, S., 2003. Evaluation of different methods of irrigation schedule based on alfalfa yield and water use efficiency. Journal of Agricultural Science 13(2): 77-88.
Onoz, B., and Bayazit, M., 2003. The power of statistical tests for trend detection. Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences 27: 247–251.
Oweis, S., Zhang, H., and Pala, M., 2000. Water use efficiency of rainfed and irrigated bread wheat in a Mediterranean environment. Agronomy Journal 92: 231–238.
Oweis, T., and Hachum, A., 2009. Supplemental irrigation for improved rainfed agriculture in WANA region. In: Wani, S.P., Rockstrom, J., Oweis, T. (Eds.). Rainfed Agriculture: Unlocking the Potential. Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture Series 7, CABI, London, UK, pp. 182-196.
Raei Jadidi, M., Homayounifar, M., Sabuhi Sabuni, M., and Kheradmand, V., 2010. Determination of energy use efficiency and productivity in tomato production. Agricultural Economics and Development 24(3): 363-370.
Rahimi, M.M., Delshad, M., liyaghat, A., and Rahmatian, A., 2014. Improving water/fertilizer use efficiency of

hydroponically cultured greenhouse tomato by partial root zone drying, deficit irrigation and hydrogel amendment. Iranian Journal of Horticultural Science 45(2): 175-184. (In Persian with English Summary)

Sadeghi, B. 2012. Effect of corm weight on saffron flowering. Proceedings of the 4th International Saffron Symposium. Keshmir. Iran.

Sadras, V.O., and Angus, J.F., 2006. Benchmarking water use efficiency of rainfed wheat crops in dry mega-environments. Australian Journal of Agricultural Research 57: 847–856.

Shaozhong, K., Shi, W., and Zhang, J., 2000. An improved water-use efficiency for maize grown under regulated deficit irrigation. Field Crop Research 67: 207-214.

Wood, M., Pibean, C.A.M. Neill, M.C., and Harries, H., 1997. Nitrogen cycling in a dry- land cereal-legume rotation system. Pages: 71-78. In: J. Ryan (Ed.). Accomplishments and future challenges in dryland soil fertility research in the Mediterranean area. ICARDA. Aleppo. Syria.

Yea, Q., Yang, X., Dai, S., Chen, G., Lie, Y. and Zhang, C., 2015. Effects of climate change on suitable rice cropping areas, croppingsystems and crop water requirements in southern China. Agricultural Water Management 159: 35-44.

Zwart, S.J., and Bastiaansen, W.G.M., 2004. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. Agricultural Water Management 69(2): 115-133.